

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель:

Голенков В. А. д.т.н., проф.

Зам. председателя:

Степанов Ю. С. д.т.н., проф.

Светкин В. В. к.т.н. доц.

Колчунов В. И. д.т.н., проф.

Гордон В. А. д.т.н., проф.

Константинов И. С. д.т.н., проф.

Садков В. Г. д.э.н., проф.

Кулаков А. Ф. к.т.н., доц.

Фролова Н. А. к.социол.н., доц.

Соков О. А. к.т.н., доц.

Борзенков М. И. к.т.н., доц.

Поландова Л. И.

Одолева М. В.

РЕДКОЛЛЕГИЯ СЕРИИ

Главный редактор:

Степанов Ю. С. д.т.н., проф.

Зам. главного редактора:

Киричек А. В. д.т.н., проф.

Зам. главного редактора:

Подмастерьев К. В. д.т.н., проф.

Васильев А. С. д.т.н., проф.

Васин С. А. д.т.н., проф.

Дальский А. М. д.т.н., проф.

Зубарев Ю. М. д.т.н., проф.

Суслов А. Г. д.т.н., проф.

Технический редактор:

Марков В. В. к.т.н.

Художественный редактор:

Барсуков Г. В. к.т.н. доц.

Компьютерная верстка:

Марков В. В. к.т.н.

АДРЕС РЕДАКЦИИ СЕРИИ

302020 Россия, Орел,

Наугорское шоссе, д. 29

Кафедра ПМиС

Редколлегия журнала

Известия ОрелГТУ.

Серия «Машиностроение.

Приборостроение»

тел: (4862) 41-98-76, 41-98-18

факс: (4862) 41-66-84

E-mail: [pms35@mail.osu.ru](mailto:pms35@mail.osu.ru)

Зарегистрировано в Министерстве РФ

по делам печати, телерадиовещания

и средств массовой информации

Свидетельство: ПИ № 77-15496

от 20 мая 2003 г.

Формат 69×90/8

Печать ризография.

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 7

Тираж 500 экз.

© ОрелГТУ, 2006

СОДЕРЖАНИЕ

• ПРИБОРЫ. МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ

- Малинин А.В. Разработка программных средств для ведения баз данных и дефектометрической оценки поверхностных дефектов, выявляемых вихретоковым методом ..... 2
- Суздальцев А.И., Замяткин А.В. Диагностирование режимов оборудования технологического процесса сушки капиллярно-пористых материалов по органолептическим нечетким параметрам выходного продукта ..... 4
- Подмастерьев К.В., Петрова О.С. Проблема активного контроля температуры воздуха в помещениях лечебно-профилактических учреждений ..... 6
- Курдюмова Л.Н., Маркова Н.Н., Радченко С.Ю. Исследование влияния комплексного локального нагружения на структуру и свойства хромоникелевой стали ..... 10
- Грядунова Е.Н. Кинетическое уравнение распределения частиц в термодинамической равновесной среде ..... 13
- Моисеев П.П., Рожавский Э.И., Драпезо А.П. Применение малогабаритных датчиков углового положения в сканирующих устройствах космического назначения ..... 15

• ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ В БИОЛОГИИ И МЕДИЦИНЕ

- Дунаев А.В., Митюрин М.В., Титов М.Н., Полянский С.В. Особенности построения и работы портативных лазерных терапевтических аппаратов с импульсно-модулированными режимами излучения ..... 16
- Бобров А.В. Регистрация слабых физических полей преобразователями на двойных электрических слоях ..... 18
- Яковенко М.В. Исследование динамических характеристик ударного объема крови в аспекте построения биуправляемых физиотерапевтических аппаратов ..... 28

• ТРИБОЛОГИЯ И ТРИБОМОНИТОРИНГ

- Кузнецова Е.В. Максимальные температуры в зоне трения и причины, затрудняющие их определение ..... 31
- Корндорф С.Ф., Чекашова Н.В. Разделение каналов по частоте при измерении температуры смазочной пленки в зоне трения термозумовым методом ..... 32
- Подмастерьев К.В., Марков В.В. Способ контроля качества колец подшипника качения в узле технической системы ..... 35
- Нахолкин Е.В., Фокин Н.И. Применение четырехшариковой схемы трения для оценки вязкостно-температурных характеристик смазочных материалов электрическим методом ..... 39
- Мишин В.В., Сидоров А.М. Стендовое оборудование для приработки и диагностирования подшипников ..... 42
- Захаров М.Г. Особенности диагностирования трибосопрежений электропараметрическими методами ..... 46

• ЭЛЕМЕНТЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ

- Косчинский С.Л., Ретинский С.Н. Экспериментальное исследование динамики импульсного преобразователя напряжения с аналоговым и нечетким ПИД-регуляторами ..... 51

• ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ

- Гладков А.П., Кваскова Т.В., Тарапанов А.А. Автоматизированный синтез конструктивных решений ..... 55

• ТЕХНОЛОГИЯ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

- Степанов Ю.С., Барсуков Г.В., Михеев А.В. Моделирование траектории движения абразивного зерна при гидроабразивном резании конструкционных материалов ..... 58
- Степанов Ю.С., Афанасьев Б.И., Фомин Д.С. Выходной структурно-несоднородный отрезной круг ..... 61

• ТЕХНОЛОГИЯ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ

- Афонин А.Н. САПР роликов повышенной стойкости для накатывания наружных резьб с осевой подачей ..... 64

• ТЕХНОЛОГИЯ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ

- Бородин М.В., Брусов С.И., Тарапанов А.С. Методика определения шероховатости винтовой поверхности при обработке роторов героторных насосов ..... 67

• СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

- Углова Н.В., Лисовская З.П. Стандартизация как механизм управления качеством в здравоохранении ..... 71

ПРИБОРЫ, МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ

УДК 621.3

Асп. Малинин А.В.

(Московский государственный университет приборостроения и информатики)  
Россия, г. Москва, тел. (495)2837812, E-mail: [rabix@mosrent.ru](mailto:rabix@mosrent.ru)

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ВЕДЕНИЯ  
БАЗ ДАННЫХ И ДЕФЕКТОМЕТРИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ  
ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ, ВЫЯВЛЯЕМЫХ  
ВИХРЕТОКОВЫМ МЕТОДОМ

The brought thumbnail sketch software packages for conduct electronic database and generations of the diagrams for mathematical model of the process of the electromagnetic additional converter the whirlwind current with pivotal magnetic wire. The brought methods of the estimation surface defect by means of confidential interval.

Вихретоковый метод применяется в основном для контроля качества электропроводящих объектов. Одно из преимуществ этого метода заключается в его многопараметровости. Однако при контроле одного из параметров, влияние остальных на сигнал преобразователя становится мешающим.

Достоверность получаемой информации при вихретоковом контроле зависит от правильной настройки дефектоскопа под конкретный объект. Поэтому необходимо проводить теоретические и экспериментальные исследования применительно к выбранному типу вихретоковых преобразователей (ВТП). Оформление, хранение и последующая обработка результатов исследований являются неотъемлемыми частями процедуры неразрушающего контроля, требующими значительных затрат труда.

С помощью метода конечных элементов разработана математическая модель процесса вихретокового

контроля металлоизделий накладным ВТП с ферромагнитным стержневым сердечником (рис. 1).

Объект контроля (ОК) имеет дефект сплошности типа «трещина» с изменяемыми параметрами:

- глубина трещины (0,1...1 мм),
- ширина трещины (0,005...0,1 мм);
- длина трещины (0,5...1000 мм).

Разработанная математическая модель функционирования ВТП, учитывающая магнитные и электрические свойства ОК позволила создать обширную базу данных основных функциональных зависимостей в комплексном виде. Для анализа изменяемых факторов был создан программный комплекс с возможностью поиска и генерации диаграмм, необходимых для разработчика.

Поиск осуществляется как для отдельно взятых параметров, так и в заданном интервале (рис. 2).

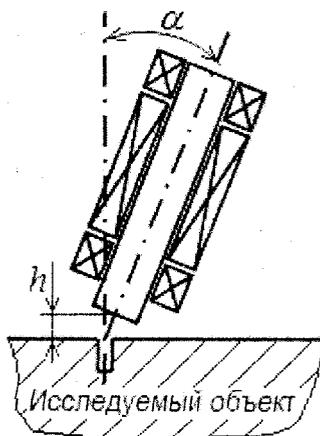


Рис. 1. Геометрическая расчетная модель

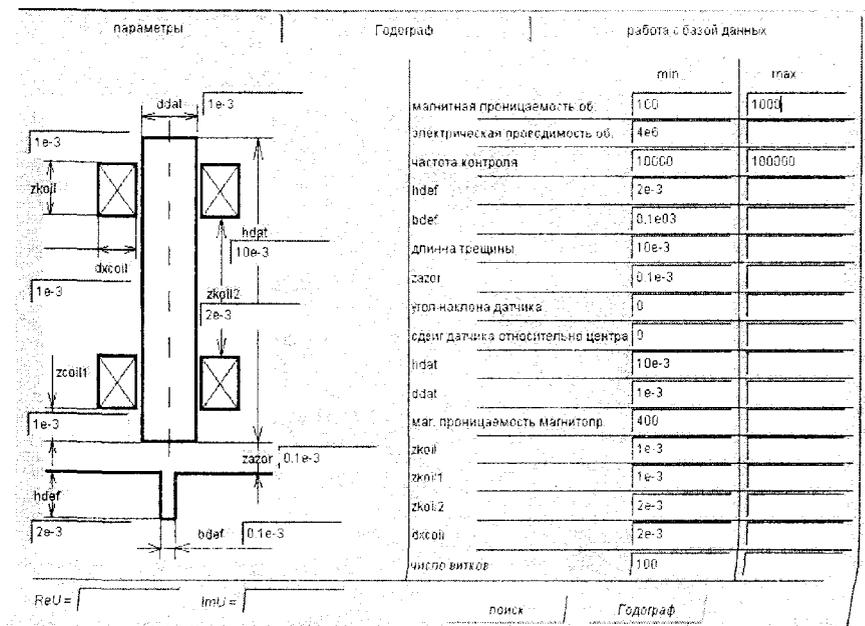


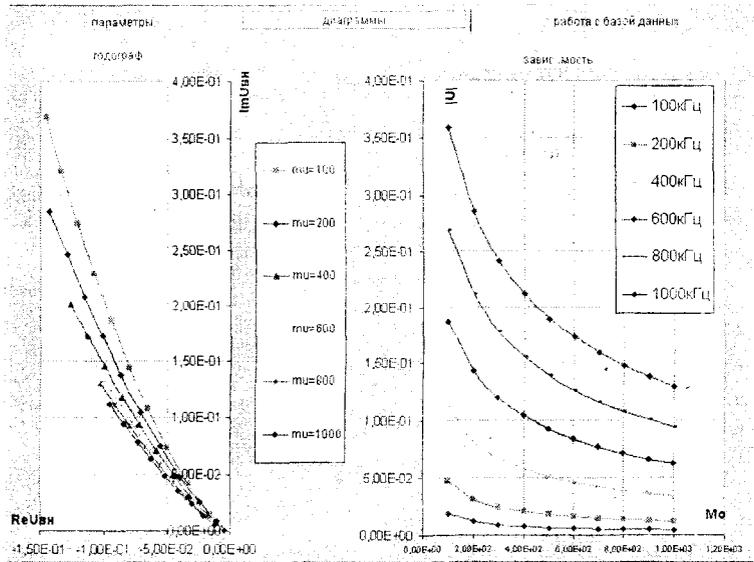
Рис. 2. Внешний вид программного комплекса для работы с базой данных

Диаграммы представлены в виде годографа вносимого напряжения для различных параметров ВТП или ОК в определённом диапазоне и в виде зависимости модуля вносимого напряжения от вносимых параметров (рис. 3).

Из-за многопараметровости вихретокового контроля при контроле одного из параметров влияние остальных на сигнал преобразователя становится

мешающим. В связи с этим целесообразно учитывать вычисленные с помощью базы данных доверительные интервалы, в пределах которых измеренная величина может менять своё значение (рис. 4).

В состав разработанного программного комплекса входит элемент по работе с базой данных. Этот элемент позволяет вносить полученные в ходе исследований данные для последующей обработки.



Слева – годограф вносимого напряжения для различных магнитных проницаемостей дефекта в диапазоне частот 10...100 кГц.

Справа – зависимость модуля вносимого напряжения  $|U|$  от изменения магнитной проницаемости дефекта.

Возможно выявление поверхностных дефектов в различных объектах из магнитных и немагнитных сталей, цветных, тугоплавких металлов и сплавов.

Рис. 3. Диаграммы, моделируемые с помощью программного комплекса

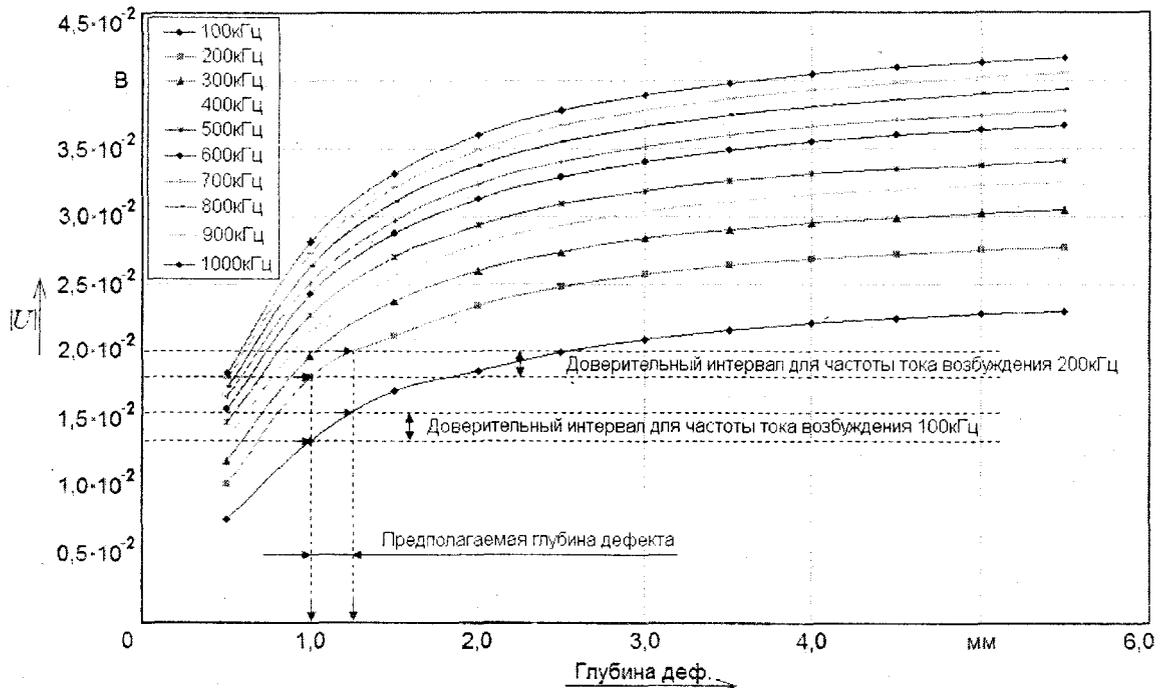


Рис. 4. Зависимость  $|U|$  от глубины дефекта в металлоизделии для различных частот тока возбуждения

Большинство современных процессорных дефектоскопов имеют встроенную энергонезависимую память, что дает возможность запоминать полученные в процессе контроля результаты, передавать эти результаты в ПК для последующей расшифровки и представления в виде документа. Каждый из приборов имеет свой набор данных, протокол обмена и вариант представления результатов контроля. При сравнении результатов контроля

образцов вихретоковым дефектоскопом «ГАЛС ВД-130» и результатов математического моделирования был получен набор коэффициентов для их последующего использования при дефектоскопии и настройке прибора.

**Литература:**

1 Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Мир, 1979. – 576 с.



УДК 628.542.4

Д-р техн. наук, проф. Суздальцев А.И., асп. Замяткин А.В.  
(Орловский государственный технический университет)  
Россия, г. Орел, тел. (4862)419879; E-mail: [kipra@mail.osstu.ru](mailto:kipra@mail.osstu.ru)

## ДИАГНОСТИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ОБОРУДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СУШКИ КАПИЛЛЯРНО- ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО ОРГАНОЛЕПТИЧЕСКИМ НЕЧЕТКИМ ПАРАМЕТРАМ ВЫХОДНОГО ПРОДУКТА

*In this article the possibility of modeling the process the diagnostic the regimes of means on the symptoms the final product with used the descending non-clear conclusions is show. The modeling of technological process of dry the porous materials adduced (by the primer of dry the macaroni article).*

### Введение

Конечной задачей процесса сушки капиллярно-пористых материалов (КПМ) является достижение требуемого значения выходной влажности материала. Из-за различных факторов, влияющих на процесс сушки, на выходе сушильного агрегата материал получается с заметным разбросом значений конечной влажности от ее требуемого значения. Это приводит к увеличению брака. Снижение брака в большей степени зависит не от способа сушки [1], а от САУ исполнительными органами сушильного агрегата. Характерным примером КПМ являются макаронные изделия (МИ), а традиционной САУ влагосодержанием является система управления по обратной связи, в которой датчик влагосодержания размещается на выходе сушилки. Измерение влагосодержания продукта может также производиться в лабораторных условиях [2]. При такой схеме отклонение влагосодержания продукции от заданного значения вызывается либо возмущениями на входе сушилки (например, изменение влагосодержания продуктов на входе сушилки или увеличение их массы), либо возмущениями, связанными с изменением температуры сушильного реагента на входе сушилки. Компенсация отклонений системы управления происходит в течение периода времени (много меньшего, чем период мертвого времени (время от момента поступления продукта в сушилку до времени его выхода из сушилки)), что приводит к постоянному недорегулированию или перерегулированию. И если учесть отсутствие надежных автоматических датчиков влажности КПМ в динамике, то в реальных производственных условиях качество выходного продукта оценивают по органолептическим нечетким параметрам – симптомам (например, МИ оценивают по цвету, развариваемости, времени варки и т.д.). Такие оценки не позволяют однозначно определить возмущающие факторы, воздействующие на САУ.

Таким образом, быстрое диагностирование возмущающих факторов (выход из заданного режима того или иного технологического оборудования) в САУ сушкой КПМ по нечетким выходным симптомам является одной из практических задач по-

вышения эффективности всего технологического процесса. В данной статье рассматривается нечеткая модель диагностирования отклонений в режимах САУ сушкой КПМ по нечетким симптомам выходного продукта.

### Постановка задачи

Задача формулируется следующим образом. По наблюдаемым симптомам выходного продукта, представляющих собой пространство заключений  $Y = \{y_1; y_2; y_3; y_4 \dots y_m\}$ , определить главный возмущающий фактор (изменение того или иного режима оборудования) входящий в пространство предпосылок  $X = \{x_1; x_2; x_3; x_4 \dots x_n\}$ . Такая задача в нечетких системах получило название моделирование с использованием нисходящих нечетких выводов [3].

Возьмем в качестве примера процесс автоматизированной сушки МИ, упрощенная структура которого приведена на рис. 1. Пусть пространство возмущающих факторов  $X$  (предпосылок) содержит пять факторов ( $n = 5$ ), т.е.:

- $x_1$  – изменение режима нагревателя (изменение температуры);
- $x_2$  – изменение режима первого вентилятора (изменение скорости вращения);
- $x_3$  – изменение режима второго вентилятора;
- $x_4$  – изменение режима подачи сырых макарон (изменение скорости или массы на входе сушилке);
- $x_5$  – изменение скорости перемещения макарон внутри сушилки;

$A$  – пространство наблюдаемых симптомов выходного продукта (заключений).

$Y$  содержит четыре симптома ( $m = 4$ ), т.е.:

- $y_1$  – изменение цвета готовых МИ;
- $y_2$  – изменение развариваемости;
- $y_3$  – изменение времени варки;
- $y_4$  – изменение температуры сушильного воздуха на входе сушилки.

Причинные отношения между пространством предпосылок  $A$  и заключений  $B$  в общем виде обозначим через параметр  $R$ :

$$R = [r_{n,m}], n=1, 2 \dots 5; m=1, 2 \dots 4. \quad (1)$$

Тогда справедливо выражение:

$$A = B \circ R,$$

где  $\circ$  – правила преобразования в нечетких системах в виде максиминной композиции.

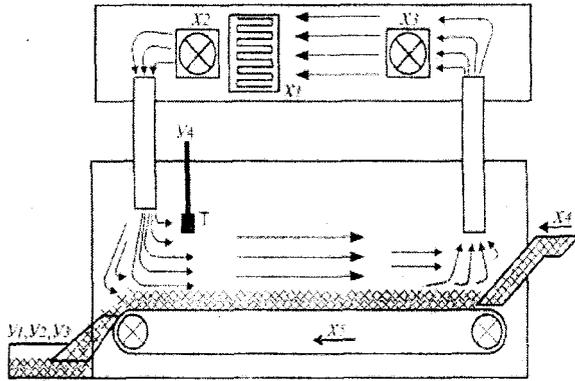


Рис. 1. Упрощенная структура процесса сушки КПМ (макаронных изделий)

**Моделирование**

При использовании нисходящих выводов наблюдаются выводы  $B$  (симптомы) в пространстве заключений  $Y$ , а определяются факторы  $A$  в пространстве предпосылок  $X$ , т.е.  $B = A \circ R$ . Таким образом, формулировка задачи (1) уточняется следующим образом. По наблюдаемым симптомам  $B(y_1, y_2, y_3, y_4)$  и известному идентификатору  $R$  определить наиболее вероятные факторы  $A(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$ . Идентификатор  $R$  определяется экспертом или технологом по экспериментальным данным за достаточно большой промежуток времени.

Пусть значения  $R$  представлены выражением (2).

$$R = \begin{bmatrix} 0,6 & 0,2 & 0,3 & 0,9 \\ 0,5 & 0,3 & 0,1 & 0,7 \\ 0,2 & 0,1 & 0,1 & 0 \\ 0,7 & 0,3 & 0,3 & 0,1 \\ 0,8 & 0,5 & 0,3 & 0,1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

И пусть обслуживающий персонал обнаружил изменение в цвете МИ ( $y_1$ ) и изменение в развариваемости ( $y_2$ ), а остальные параметры (симптомы) близки к норме.

Для этого случая состояние объекта можно оценить так:

$$B_1 = 0,7/y_1 + 0,3/y_2 + 0,3/y_3 + 0,1/y_4 \quad (3)$$

или

$$B_2 = 0,8/y_1 + 0,5/y_2 + 0,3/y_3 + 0,1/y_4.$$

Тогда необходимо определить причины  $A_1$  или  $A_2$ , характеризующиеся отношениями:

$$\begin{aligned} A_1 &= a'_1/x_1 + a'_2/x_2 + a'_3/x_3 + a'_4/x_4 + a'_5/x_5 \\ A_2 &= a''_1/x_1 + a''_2/x_2 + a''_3/x_3 + a''_4/x_4 + a''_5/x_5 \end{aligned} \quad (4)$$

Запишем нечеткие вектора строки в виде 2-х вариантов.

$$\begin{aligned} \hat{A}_1 &= [0,7; 0,3; 0,3; 0,1] \\ \hat{A}_1 &= [\hat{a}'_1; \hat{a}'_2; \hat{a}'_3; \hat{a}'_4; a_5] \end{aligned} \quad \text{I вариант.} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \hat{A}_2 &= [0,8; 0,5; 0,3; 0,1] \\ \hat{A}_1 &= [\hat{a}''_1; \hat{a}''_2; \hat{a}''_3; \hat{a}''_4; a_5] \end{aligned} \quad \text{II вариант.} \quad (6)$$

И теперь выражение (1) можно представить с учетом (5) и (6) так:

$$\begin{bmatrix} 0,7 \\ 0,3 \\ 0,3 \\ 0,1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,6 & 0,5 & 0,2 & 0,7 & 0,8 \\ 0,2 & 0,3 & 0,1 & 0,3 & 0,5 \\ 0,3 & 0,1 & 0,1 & 0,3 & 0,3 \\ 0,9 & 0,7 & 0 & 0,1 & 0,1 \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} \hat{a}'_1 \\ \hat{a}'_2 \\ M \\ \hat{a}'_5 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} 0,8 \\ 0,5 \\ 0,3 \\ 0,1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,6 & 0,5 & 0,2 & 0,7 & 0,8 \\ 0,2 & 0,3 & 0,1 & 0,3 & 0,5 \\ 0,3 & 0,1 & 0,1 & 0,3 & 0,3 \\ 0,9 & 0,7 & 0 & 0,1 & 0,1 \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} \hat{a}''_1 \\ \hat{a}''_2 \\ M \\ \hat{a}''_5 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Используя в качестве правила  $\circ$  максиминную композицию, выражение (7) примет вид:

$$\begin{aligned} 0,7 &= (0,6 \wedge \hat{a}'_1) \vee (0,5 \wedge \hat{a}'_2) \vee (0,2 \wedge \hat{a}'_3) \vee (0,7 \wedge \hat{a}'_4) \vee (0,8 \wedge \hat{a}'_5) \\ 0,3 &= (0,2 \wedge \hat{a}'_1) \vee (0,3 \wedge \hat{a}'_2) \vee (0,1 \wedge \hat{a}'_3) \vee (0,3 \wedge \hat{a}'_4) \vee (0,5 \wedge \hat{a}'_5) \\ 0,3 &= (0,3 \wedge \hat{a}'_1) \vee (0,1 \wedge \hat{a}'_2) \vee (0,1 \wedge \hat{a}'_3) \vee (0,3 \wedge \hat{a}'_4) \vee (0,3 \wedge \hat{a}'_5) \\ 0,1 &= (0,9 \wedge \hat{a}'_1) \vee (0,7 \wedge \hat{a}'_2) \vee (0 \wedge \hat{a}'_3) \vee (0,1 \wedge \hat{a}'_4) \vee (0,1 \wedge \hat{a}'_5) \end{aligned} \quad (9)$$

Аналогично выражение (8) примет вид:

$$\begin{aligned} 0,8 &= (0,6 \wedge \hat{a}''_1) \vee (0,5 \wedge \hat{a}''_2) \vee (0,2 \wedge \hat{a}''_3) \vee (0,7 \wedge \hat{a}''_4) \vee (0,8 \wedge \hat{a}''_5) \\ 0,5 &= (0,2 \wedge \hat{a}''_1) \vee (0,3 \wedge \hat{a}''_2) \vee (0,1 \wedge \hat{a}''_3) \vee (0,3 \wedge \hat{a}''_4) \vee (0,5 \wedge \hat{a}''_5) \\ 0,3 &= (0,3 \wedge \hat{a}''_1) \vee (0,1 \wedge \hat{a}''_2) \vee (0,1 \wedge \hat{a}''_3) \vee (0,3 \wedge \hat{a}''_4) \vee (0,3 \wedge \hat{a}''_5) \\ 0,1 &= (0,9 \wedge \hat{a}''_1) \vee (0,7 \wedge \hat{a}''_2) \vee (0 \wedge \hat{a}''_3) \vee (0,1 \wedge \hat{a}''_4) \vee (0,1 \wedge \hat{a}''_5) \end{aligned} \quad (10)$$

Решаем систему уравнений (9) и находим значения параметров:

$$\text{Из первого уравнения: } \hat{a}'_4 \geq 0,7; 0,7 \leq \hat{a}'_5.$$

$$\text{Из второго: } \hat{a}'_2 \geq 0,3; \hat{a}'_4 \geq 0,3; 0,3 \leq \hat{a}'_5 < 0,5.$$

$$\text{Из третьего: } \hat{a}'_1 \geq 0,3; \hat{a}'_4 \geq 0,3; \hat{a}'_5 \geq 0,3.$$

Из четвертого уравнения:

$$0,1 \leq \hat{a}'_1 < 0,9; 0,1 \leq \hat{a}'_2 < 0,7; \hat{a}'_4 \geq 0,1; \hat{a}'_5 \geq 0,1.$$

Результат:

$$\hat{a}'_4 \geq 0,7; 0,3 \leq \hat{a}'_5 < 0,5; 0,3 \leq \hat{a}'_2 < 0,7; 0,3 \leq \hat{a}'_1 < 0,9.$$

Решаем систему уравнений (10) и находим значения параметров:

$$\text{Из первого уравнения: } \hat{a}''_5 \geq 0,8.$$

$$\text{Из второго уравнения: } \hat{a}''_5 \geq 0,5.$$

$$\text{Из третьего: } \hat{a}''_1 \geq 0,3; \hat{a}''_4 \geq 0,3; \hat{a}''_5 \geq 0,3.$$

Из четвертого уравнения:

$$0,1 \leq \hat{a}''_1 < 0,9; 0,1 \leq \hat{a}''_2 < 0,7; \hat{a}''_5 \geq 0,1$$

Результат:

$$0,3 \leq \hat{a}''_1 < 0,9; 0,1 \leq \hat{a}''_2 < 0,7; \hat{a}''_4 \geq 0,3; 0,8 \leq \hat{a}''_5 < 1,0.$$

После объединения результатов решения систем уравнений (9) и (10) получим:

$$0,3 \leq a_1 < 0,9;$$

$$0,1 \leq a_2 < 0,3;$$

$$a_4 \geq 0,7;$$

$$0,3 \leq a_5 < 0,5; a_5 \geq 0,8.$$

Графическая иллюстрация результатов приведена на рис. 2.

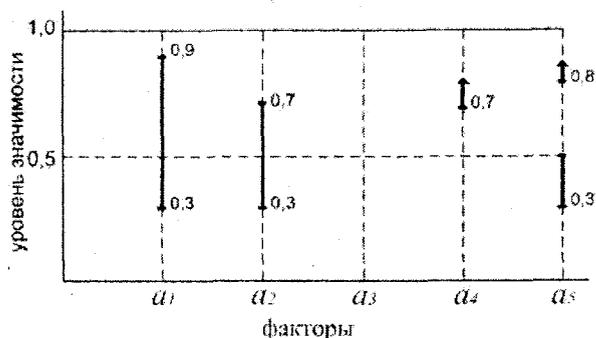


Рис. 2. Иллюстрация результатов решения уравнений в нечетком представлении

Анализ результатов решения уравнений нечетких нисходящих выводов в данном случае показывает, что по двум наблюдаемым симптомам (изменение цвета и развариваемости МИ) наиболее вероятными причинами (факторами) являются изменения режима транспортирования их в сушильном агрегате ( $a_5 \geq 0,8$ ) или изменение режима подачи сырых макарон ( $a_4 \geq 0,7$ ). Фактор изменения режима нагревателя ( $0,3 \leq a_1 < 0,9$ ) не может быть принят во внимание, так как симптом, определяющий этот фактор  $u_4$ , мало изменился при наблюдении.

**Заключение**

Использование нисходящих нечетких выводов предполагает рассматривать нечеткое моделирование в виде системы уравнений первого порядка, решение которых легко автоматизируется, что обеспечивает быструю диагностику отклонений в режимах оборудования САУ по наблюдаемым симптомам выходного продукта. В ОрелГТУ на кафедре ПТЭиВС проводятся работы по моделированию процессов диагностики отклонений режимов оборудования рассмотренным методом с количеством симптомов до десяти с определением до 1,5 десятков факторов.

**Литература:**

- 1 Замяткин А.В. Анализ способов сушки капиллярно-пористых материалов и методов их автоматизации / А.В. Замяткин, А.И. Суздальцев // Энерго- и ресурсосбережение – XXI век. Матер. третьей междунар. науч.-практ. конф. – Орел: ОрелГТУ, изд. дом «Орлик», 2005. – С. 234-236.
- 2 Тиняков С.Е. Совершенствование управления сушильным комплексом в целях повышения качества продукции и экономии электрических затрат / С.Е. Тиняков, В.О. Андреев, А.И. Суздальцев // Энерго- и ресурсосбережение – XXI век. Матер. третьей междунар. науч.-практ. конф. – Орел: ОрелГТУ, изд. дом «Орлик», 2005. – С. 172-176.
- 3 Прикладные нечеткие системы: пер. с японского / К. Асаи, Д. Ватада, С. Иваи [и др.]; под ред. Т. Тэрано, К. Асаки, М. Сугэно – М.: Мир, 1993. – 386 с.

УДК 620.1

Д-р техн. наук, проф. Подмастерьев К.В., асп. Петрова О.С.  
(Орловский государственный технический университет)  
Россия, г. Орел, тел. (4862)419876; E-mail: pms35@mail.ostu.ru

## ПРОБЛЕМА АКТИВНОГО КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В ПОМЕЩЕНИЯХ ЛЕЧЕБНО-ПРОФИЛАКТИЧЕСКИХ УЧРЕЖДЕНИЙ

*In this article the necessity of the creation of methods of active control the temperature of air in the lodging of medical and prophylactic institution are base ones arguments. The requirements in the means of active control the temperature, which will be suitable by the use in the lodgings with the one-pipe systems of heating, are base ones arguments.*

Создание комфортных температурных условий в отапливаемых помещениях лечебно – профилактических учреждений (ЛПУ) и экономное расходование тепловой энергии является важной социально-экономической задачей.

Согласно работам [1, 2] в помещениях ЛПУ требуется поддерживать определенный тепловой микроклимат, характеризуемый температурой воздуха в помещении, скоростью его движения, относительной влажностью и радиационной температурой внутренних поверхностей ограждений. Основным

показателем, влияющим на самочувствие человека, является температура воздуха в помещении [3, 4], значение которой в помещениях ЛПУ различных категорий рекомендуется поддерживать в соответствии с данными, указанными в таблице 1.

Состояние температурного комфорта человека определяется не только температурой воздуха в помещении  $t_v$ , но и температурой внутренних поверхностей ограждений  $t_R$ . Когда эти температуры равны, наблюдаются условия температурного комфорта, что очень важно для деятельности человека [5].

Таблица 1 – Рекомендуемые значения температуры помещений ЛПУ [1]

Наименование помещений	Температура, °С
1 Манипуляционные туалетные помещения для новорожденных	25
2 Кабинеты функциональной диагностики, помещения для ректороманоскопии	22
3 Малые операционные	22
4 Санузлы, умывальные комнаты, клизменная	20
5 Кабинеты врачей, комнаты персонала, комнаты отдыха для больных, пользующихся процедурами водолечения и грязелечения, кабинеты иглотерапии, помещения выписки, кабинеты аудиометрии, антропометрии, диспетчерские приема вызовов и направления бригад, комнаты отдыха диспетчеров, врачей, фельдшеров, санитаров, шоферов, выездных бригад, медицинской статистики	20
6 Процедурные для рентгеновских снимков зубов, моечные лабораторий посуды, патологоанатомических отделений, комнаты управления рентгеновских кабинетов и радиологических отделений, фотолаборатория	18
7 Залы лечебной физической культуры	18
8 Помещения дезинфекционных камер, помещения очистки и мойки инвентаря, пищеварочный зал	16

Кроме этого, состояние температурного комфорта человека определяется видом выполняемой им работы. В спокойном состоянии нормируемое значение температуры воздуха в помещении, соответствующее комфортным условиям при разной интенсивности выполняемой физической работы, равно около 23 °С; для помещений, где человек выполняет легкую работу – 21 °С, работу средней тяжести – 18,5 °С и тяжелую работу – 16 °С [5].

Следует отметить, что возможность снижения требуемой температуры в помещении всего на 1 °С обеспечивает экономию тепловой энергии в пределах 5 % [6]. Таким образом, поддержание комфортной температуры воздуха в помещениях ЛПУ на заданном уровне с учетом рекомендаций таблицы 1 и высказанных выше соображений имеет не только социальное, но и экономическое значение.

Анализ состояния вопроса показывает, что температура воздуха в помещении ЛПУ определяется его тепловым балансом и зависит от теплопоступлений и тепловых потерь. К теплопоступлениям относятся теплоотдача отопительных приборов, бытовые тепловыделения и солнечная радиация. Потери тепловой энергии происходят через теплоемкие (стены) и нетеплоемкие ограждающие конструкции (окна). Нарушение равновесия между поступлением и потерями тепловой энергии вызывает изменение температуры воздуха в помещении.

Тепловые процессы в отапливаемом помещении ЛПУ характеризуются непрерывным обменом энергии между отдельными объектами (воздух, внутренние стены и др.). Уравнение теплового баланса помещения имеет вид [8]:

$$Q_{\text{общ}} = Q_{\text{от}} + Q_{\text{быт}} + Q_{\text{инс}} - Q_{\text{ст}} - Q_{\text{ок}} - Q_{\text{инф}}, \quad (1)$$

где  $Q_{\text{от}}$  – поступление тепловой энергии от отопительных приборов системы центрального отопления, Вт·ч;

$Q_{\text{быт}}$  – бытовые тепловыделения, Вт·ч;

$Q_{\text{инс}}$  – инсоляционные теплопоступления, Вт·ч;

$Q_{\text{ст}}$  – потери тепловой энергии через теплоемкие ограждения, Вт·ч;

$Q_{\text{ок}}$  – потери тепловой энергии через нетеплоемкие ограждения, Вт·ч;

$Q_{\text{инф}}$  – потери тепловой энергии инфильтрацией, Вт·ч.

Поступление тепловой энергии от отопительных приборов системы центрального отопления определяется по формуле [3]:

$$Q_{\text{от}} = K_{\text{н.п.}} \cdot F_{\text{н.п.}} \cdot (t_{\text{н.п.}} - t_{\text{в}}), \quad (2)$$

где  $t_{\text{н.п.}}$  – средняя температура теплоносителя в отопительном приборе [3]:

$$t_{\text{н.п.}} = 0,5(t_1 + t_2), \quad (3)$$

где  $t_1$  и  $t_2$  – температура теплоносителя на входе в отопительный прибор и на выходе из него, °С;

$F_{\text{н.п.}}$  – площадь теплоотдающей поверхности отопительного прибора, м<sup>2</sup>;

$K_{\text{н.п.}}$  – коэффициент теплопередачи отопительного прибора.

Значение коэффициента  $K_{\text{н.п.}}$  устанавливается при проведении специальных теплотехнических испытаний и вычисляется по формуле [3]:

$$K_{\text{н.п.}} = m \cdot \Delta t^n \cdot G_{\text{отн}}^p, \quad (4)$$

где  $m, n, p$  – эмпирические числовые коэффициенты;  $\Delta t$  – разность между средней температурой отопительного прибора и температурой помещения, °С;

$G_{\text{отн}}$  – относительный расход воды в отопительном приборе.

Согласно СНиП 23-02-2003, величина бытовых тепловыделений  $Q_{\text{быт}}$  составляет 17 Вт·ч на 1 м<sup>2</sup> площади помещения [2, 3].

Инсоляционные теплопоступления [9]:

$$Q_{\text{инс}} = Q_{\text{норм}} \cdot \cos \theta \cdot K_n \cdot F_0, \quad (5)$$

где  $F_0$  – поверхность остекления, м<sup>2</sup>;

$K_n$  – коэффициент инсоляции, равный [9]:

$$K_n = \tau_1 \cdot \tau_2 \cdot \tau_3 \cdot \tau_4, \quad (6)$$

где  $\tau_1$  – коэффициент пропускания солнечной радиации стеклом;

$\tau_2$  – коэффициент загрязнения остекленной поверхности;

$\tau_3$  – коэффициент затенения переплетом;

$\tau_4$  – относительный коэффициент пропускания, характеризующий уменьшение количества пропускаемых стеклом лучей при увеличении угла между направлением лучей и нормалью к поверхности;

$\cos\theta$  – косинус угла между направлением луча и нормалью к поверхности.

Значения указанных коэффициентов для окон в деревянных рамах с двойным остеклением приведены в таблице 2.

Потери тепловой энергии через теплоемкие ограждения определяются из выражения [3]:

$$Q_{ст} = K \cdot (t_{в} - t_{5}) \cdot n \cdot F \cdot \eta, \quad (7)$$

где  $K$  – коэффициент теплопередачи для наружных стен и перекрытий, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);

$t_{в}$  – расчетная температура внутри помещения, °C;

$t_{5}$  – температура наиболее холодной пятидневки для района строительства, °C;

$n$  – коэффициент, учитывающий уменьшение разности температур  $t_{в} - t_{н}$ ;

$F$  – площадь наружных стен и перекрытий, м<sup>2</sup>;

$\eta$  – коэффициент, учитывающий добавочные тепловые потери.

Таблица 2 – Значения коэффициентов пропускания солнечных лучей окнами с двойным остеклением [9]

Наименование коэффициентов	Значения коэффициентов	
	принятые Разумовым	принятые Гамбургом
Коэффициент пропускания стеклом $\tau_1$ .....	0,9	0,9
Коэффициент загрязнения $\tau_2$ .....	0,8	0,81
Коэффициент затенения $\tau_3$ .....	0,7	0,3..0,55
Относительный коэффициент пропускания $\tau_4$ при $\theta$ (град):	0 .....	1,0
	30 .....	0,997
	60 .....	0,896

Значения потерь тепловой энергии через нетеплоемкие ограждения  $Q_{ок}$  зависят от площади окна и номера этажа [3, таблица 1.8]. Потери тепловой энергии инфильтрацией  $Q_{инф}$  находят по формуле:

$$Q_{инф} = 0,278 \cdot c \cdot \Sigma F \cdot G_0 \cdot A \cdot (t_{в} - t_{н}), \quad (8)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость воздуха, равная 1,005 кДж/(кг·°C);

$F$  – расчетная площадь окон, м<sup>2</sup>;

$G_0$  – расход воздуха, поступающего в помещение путем инфильтрации через 1 м<sup>2</sup> окон и балконных дверей, кг/(м<sup>2</sup>·ч);

$A$  – коэффициент, учитывающий подогрев воздуха, принимаемый равным для окон с разделенными переплетами 0,8, а для спаренных переплетов 1 [9].

Подставим в равенство (1) выражения (2) – (8) и выразим температуру воздуха внутри помещения:

$$\begin{aligned} t_{в} = & (m \cdot \Delta t^n \cdot G_{отн}^p \cdot F_{от} \cdot \frac{t_1 + t_2}{2} + Q_{быт} + \\ & + Q_{норм} \cdot \cos\theta \cdot \tau_1 \cdot \tau_2 \cdot \tau_3 \cdot \tau_4 \cdot F_0 + \\ & + K \cdot n \cdot F \cdot \eta \cdot t_5 + 0,278 \cdot c \cdot \Sigma F \cdot G_0 \cdot A \cdot t_{н}) : \\ & : (m \cdot \Delta t^n \cdot G_{отн}^p \cdot F_{от} - K \cdot n \cdot F \cdot \eta - \\ & - 0,278 \cdot c \cdot \Sigma F \cdot G_0 \cdot A) \end{aligned} \quad (9)$$

Как видно из формулы (9), температура воздуха в помещении ЛПУ зависит от многих факторов, изменяется в течение суток, зависит от времени года, метеорологических факторов (солнечной радиации и скорости ветра) и многих других характеристик.

В то же время, теплоснабжение отечественных ЛПУ осуществляется в соответствии с температурным графиком системами центрального водяного отопления, ориентированными на усредненного потребителя [10]. При этом наблюдаются нарушения комфортных температурных условий в помещениях, перерасход тепловой энергии [11], а также принципиально не может быть обеспечено под-

держание различной температуры воздуха в разных помещениях ЛПУ в соответствии с нормативными требованиями [1, 2, 10].

Поэтому для поддержания температуры воздуха в помещениях ЛПУ на заданном уровне с учетом рассмотренных выше рекомендаций возникает необходимость активного контроля и индивидуального регулирования температуры в каждом из помещений. При этом, говоря об активном контроле температуры в помещениях ЛПУ, следует выделить основные факторы и характеристики, являющиеся базовыми (таблица 3).

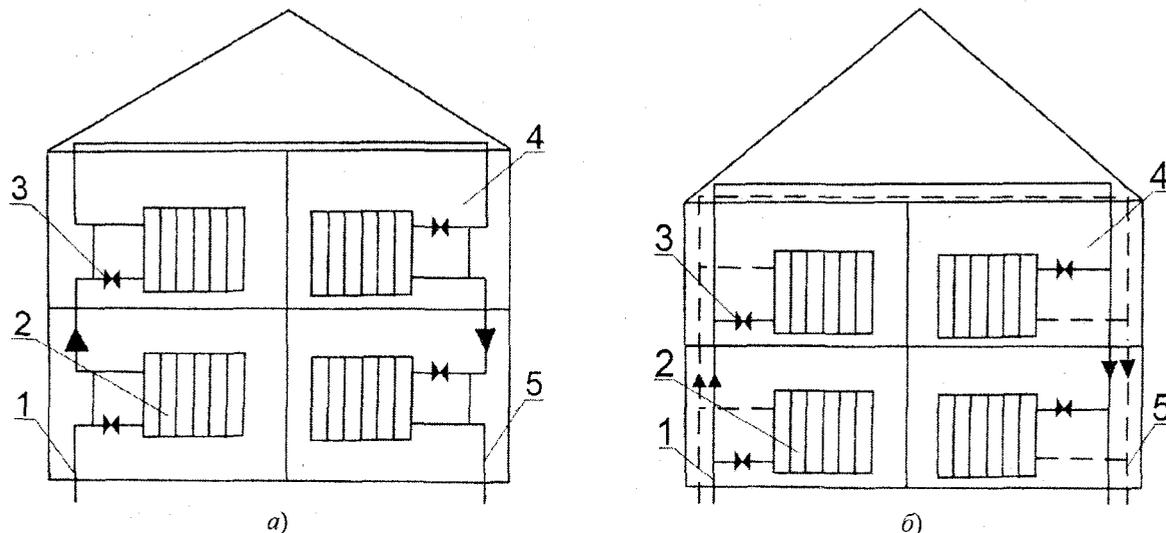
Анализируя возможные пути решения поставленной задачи, можно выделить следующие проблемы. В отечественных ЛПУ с 1970 г. широкое распространение получили однотрубные системы отопления [10], представленные на рис. 1, а. Это связано с тем, что металлоемкость таких систем существенно (на 20 %) меньше, и их индустриальность (сокращение времени на монтаж) выше, чем двухтрубных систем отопления (рис. 1, б) [9, 10].

Отечественной промышленностью и за рубежом выпускаются устройства активного контроля температуры воздуха в помещениях. Эти устройства успешно решают проблему активного контроля и регулирования температуры в помещениях, оборудованных двухтрубными системами отопления.

Однако эти устройства обладают высоким гидравлическим сопротивлением [12], что не обеспечивает требуемой эффективности контроля в условиях помещений ЛПУ с однотрубными системами отопления [2, 10]. Это объясняется тем, что в однотрубных системах отопления отопительные приборы соединены последовательно, поэтому устанавливаемые в таких системах устройства активного контроля температуры воздуха с целью повышения коэффициента затекания в отопительный прибор должны иметь низкое гидравлическое сопротивление и возможность двойной (монтажной) регулировки. Это не обеспечивается известными средствами контроля.

Таблица 3 – Базовые факторы и характеристики системы активного контроля температуры воздуха в помещениях ЛПУ

Факторы	Характеристики
1 Управляющие воздействия	1 Теплоотдача отопительных приборов
2 Возмущающие воздействия	1 Температура наружного воздуха 2 Солнечная радиация 3 Влияние ветра и фильтрации воздуха 4 Бытовые тепловыделения
3 Физиологические особенности системы терморегуляции человека	1 Неодинаковые значения комфортных температур для помещений различного назначения 2 Неодинаковые значения комфортных температур в течение различного времени суток 3 Неодинаковые значения комфортных температур для различных условий пребывания людей в помещениях (легкая и тяжелая работа, отдых, сон)



1 – подающий трубопровод; 2 – отопительный прибор; 3 – устройство активного контроля температуры воздуха в помещениях ЛПУ; 4 – помещение ЛПУ; 5 – обратный трубопровод

Рис. 1. Однотрубные (а) и двухтрубные (б) системы отопления

Таким образом, для обеспечения теплового комфорта в помещениях ЛПУ, регламентированного действующей в настоящее время нормативной документацией и санитарно-гигиеническими рекомендациями, при экономии тепловой энергии необходимы специальные устройства активного теплового контроля, пригодные для использования в помещениях с однотрубными системами отопления.

**Литература:**

1 Пособие по проектированию учреждений здравоохранения (к СНиП 2.08.02-89). Раздел I – Общие положения. Инженерное оборудование. – М.: ГипроНИИЗдрава, 1990. – 65 с.  
2 СНиП 41-01-2003. Отопление, вентиляция и кондиционирование. – М.: Госстрой России, 2004. – 98 с.  
3 Отопление и вентиляция / Под общ. ред. В.Н. Богословского. – М.: Стройиздат, 1980. – 295 с.  
4 Эргономика / Под ред. А.А. Крылова и Г.В. Суходольского. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1988. – 182 с.  
5 Богословский В.Н. Отопление / В.Н. Богославский, А.Н. Сканави. – М.: Стройиздат, 1991. – 736 с.  
6 Лапир М.А. И в XXI веке у нас неразрешимых проблем быть не должно // Энергосбережение. – 2000. – №1. – С. 3-7.

7 Степанов В.М. Теоретические основы математического моделирования и оптимизации теплового и гидравлического режимов элементов системы теплоснабжения зданий и сооружений / В.М. Степанов, В.П. Горшенин. – Тула.: Изд-во ТулГУ, 2004. – 258 с.

8 Чистович С.А. Автоматическое регулирование расхода тепла в системах теплоснабжения и отопления. – Л.: Стройиздат, 1975. – 160 с.

9 Чистович С.А. Автоматизация установок и систем теплоснабжения и отопления. – М.: Изд-во литературы по строительству, 1964. – 180 с.

10 Современное водяное отопление. Системы отопления. Монтаж. Эксплуатация: Справочник / Сост. В.И. Назаров, В.И. Рыженко – М.: Издательство ОНИКС, Литиздат, 2005. – 320 с.

11 Куклик Л.Ф. Индивидуальное регулирование температуры в отапливаемых помещениях / Л.Ф. Куклик, В.Д. Курбан, С.П. Петров // Водоснабжение и санитарная техника. – 1984. – № 8. – С. 12-13.

12 Коростелев Ю.А. К расчету горизонтальных однотрубных систем отопления / Ю.А. Коростелев, А.Н. Кулеи, С.В. Бублей // Вентиляция, отопление, кондиционирование. – 2006. – № 6. – С. 36-44.

УДК 620.1

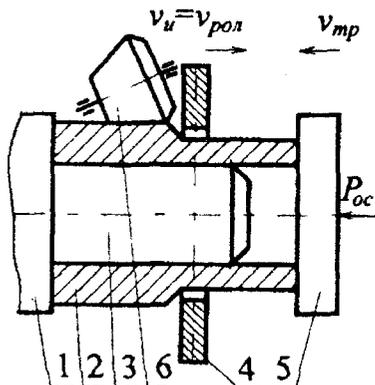
Канд. техн. наук Курдюмова Л.Н., канд. техн. наук Маркова Н.Н., д-р техн. наук, проф. Радченко С.Ю.  
(Орловский государственный технический университет)  
Россия, г. Орел, тел. (4862)419878; E-mail: pms35@mail.ostu.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОМПЛЕКСНОГО ЛОКАЛЬНОГО НАГРУЖЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ХРОМОНИКЕЛЕВОЙ СТАЛИ

*In this article show the results of the research the influence the deformation on the fall the plenty's phases from the austenite and the formation of structure the material of storage by the hot plastic deformation by the processing the metal of pressure, and the influence of deformation on the mechanical qualities of steel.*

Одним из эффективных направлений получения осесимметричных деталей в машиностроении и приборостроении является обработка давлением с комплексным локальным нагружением заготовки («валковая штамповка»). Такой способ деформирования позволяет повысить стойкость инструмента, увеличить коэффициент использования материала, повысить физико-механические и эксплуатационные характеристики обрабатываемого металла [1].

Одним из вариантов реализации валковой штамповки является технология непрерывно – последовательной высадки с обкаткой утолщения по наружному диаметру роликами (рис. 1). В частности, непрерывно-последовательная высадка с индукционным нагревом применяется для получения изделий переменного сечения большого диаметра (более 200 мм).



1 – упор; 2 – заготовка; 3 – оправка; 4 – индуктор; 5 – осаживающая траверса; 6 – ролик;  $v_u$  – скорость стола индуктора;  $v_{рол}$  – скорость подачи роликовой обоймы;  $v_{тр}$  – скорость осаживающей траверсы;  $P_{ос}$  – сила высадки

**Рис. 1. Схема непрерывно-последовательно высадки с обкаткой утолщения по наружному диаметру с наклонными осями роликов**

Обкатка поверхности заготовки в роликовой матрице относится к поверхностному пластическому деформированию. Известно, что такая обработка широко применяется для повышения долговечности и надежности деталей машин. В зависимости от типа нагрузки, поверхностное пластическое деформирование разделяется на статическое и динамическое. Для статических способов (обкатывание роликами, раскатывание, выглаживание и др.) ха-

рактерны постоянство во времени силы деформирующего воздействия на обрабатываемую поверхность и непрерывность контакта деформирующей поверхности инструмента с обрабатываемой поверхностью заготовки. Согласно работе [2], статические способы обеспечивают степень упрочнения до 60 % и выше, небольшую глубину упрочненного слоя, низкую шероховатость.

Влияние холодной пластической деформации на структурные и фазовые превращения в стали исследовано широко, однако влияние горячей пластической деформации на фазовые превращения и формирование структуры после горячей обработки давлением находится в стадии изучения.

Настоящее исследование посвящено изучению влияния деформации на выпадение избыточных фаз из аустенита и образование структуры при горячей пластической деформации при непрерывно-последовательной высадке с обкаткой утолщения по наружному диаметру роликами, а также влиянию этой деформации на механические характеристики рассматриваемой стали.

В рассматриваемом эксперименте высадке подвергалась трубная заготовка  $\varnothing 273 \times 24$  мм, материалом которой служила сталь марки 40ХН2МАШ. Высадка осуществлялась в два перехода: «свободная» высадка первого перехода – на размер  $\varnothing 310 \times 42,5$  мм и высадка второго перехода в роликовую матрицу –  $\varnothing 380 \times 77,5$  мм. Максимальная скорость деформации не превышала 10 мм/мин. Кольцевой индуктор ТВЧ нагревал заготовку в зоне пластического течения металла до температуры горячей обработки давлением (в область аустенитного состояния). Ролики обеспечили полное раскатывание радиальных складок высотой до 5...7 мм, образовавшихся в процессе формоизменения заготовки на поверхности утолщения.

В исходном состоянии сталь марки 40ХН2МАШ имеет ферритно-перлитную структуру с типичной после горячей прокатки полосчатостью (рис. 2). Полосчатость возникает в результате деформации и характеризуется вытянутыми вдоль направления деформации волокнами. Из-за этого некоторые механические свойства поперек волокон становятся ниже, чем вдоль вследствие более низкого сопротивления отрыву поперек волокна (явление анизотропии механических свойств) [3].

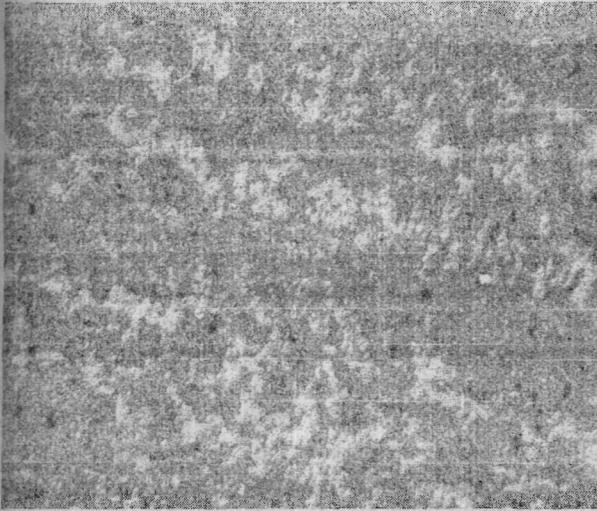


Рис. 2. Микроструктура металла исходной заготовки в равновесном состоянии,  $\times 100$

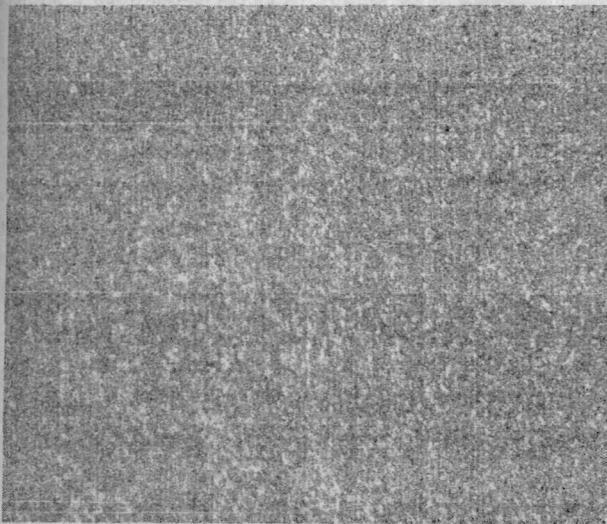


Рис. 3. Микроструктура верхнего слоя после обкатки роликами,  $\times 200$

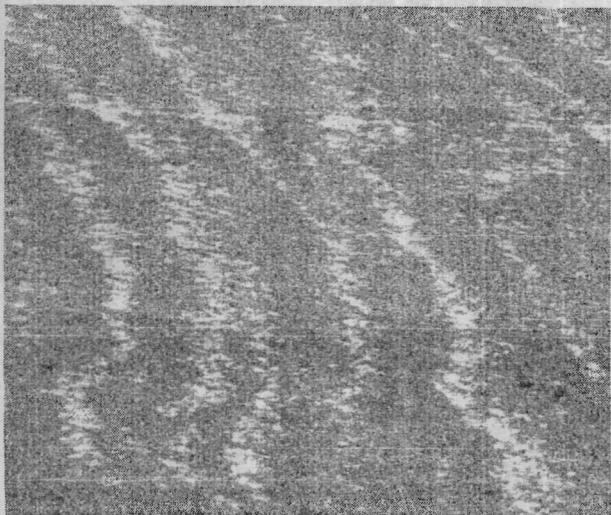


Рис. 4. Микроструктура среднего слоя,  $\times 50$

Для исследования влияния комплексного локального нагружения на металл из продольного темплета деформированной заготовки вырезали поперечные образцы шириной 20 мм. Образцы подвергали шлифованию и полированию. Для вы-

явления микроструктуры производили травление образцов в 4 %-ном растворе азотной кислоты в этиловом спирте. Микроструктуру исследовали с помощью оптического микроскопа МЕТАМ ЛВ31, начиная от наружной поверхности (под роликами) к нижней, прилежащей к оправке.

Исследование микроструктуры показали следующее. В верхней части металл имеет мелкодисперсную структуру сорбит (рис. 3).

Глубина слоя, подвергнутого обкатке, составляет около 5 мм. В средней части образца полосчатость, характерная для легированной горячекатаной стали, сохраняется, но из-за интенсивного течения металла приобретает вид волнистости (рис. 4). В нижней части утолщения, прилегающего к оправке, зерно измельчается в результате ускоренного (при нормализации) охлаждения и активного теплоотвода в массивную стальную оправку (рис. 5).

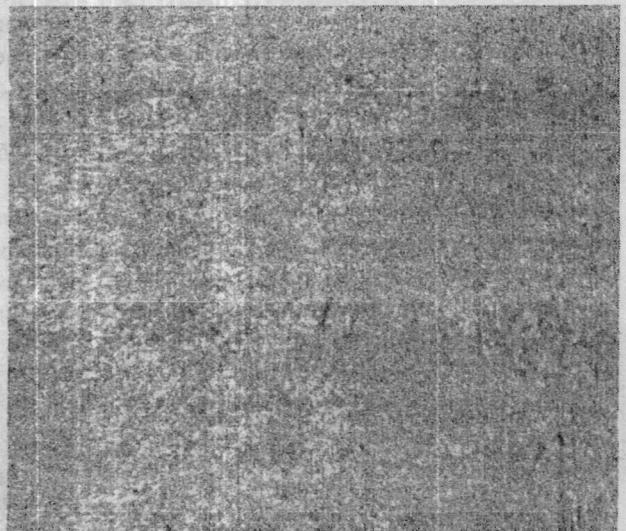


Рис. 5. Микроструктура нижнего слоя,  $\times 200$

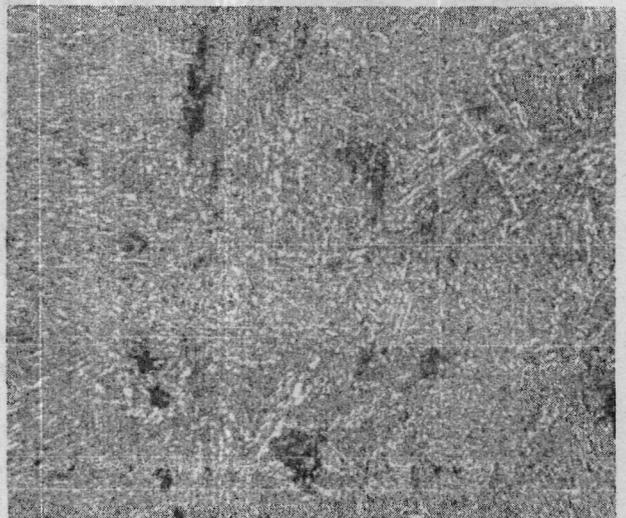


Рис. 6. Микроструктура заготовки, не подвергшейся пластической деформации,  $\times 200$

В начальной стадии горячей деформации аустенитные кристаллы часто принимают правильную граненую форму, ориентированную определенным образом относительно приложенной силы из-за

поворота кристаллов в положение наиболее благоприятное для развития скольжения. Скольжение, начинающееся при увеличивающейся степени деформации, охватывает в связи с этим одновременно большое количество зерен, которые вытягиваются, образуя вначале ромбическую форму, а затем форму сильно вытянутого зерна. Выпадение карбидов в деформируемой стали происходит как при обычном охлаждении, по границам зерен [4].

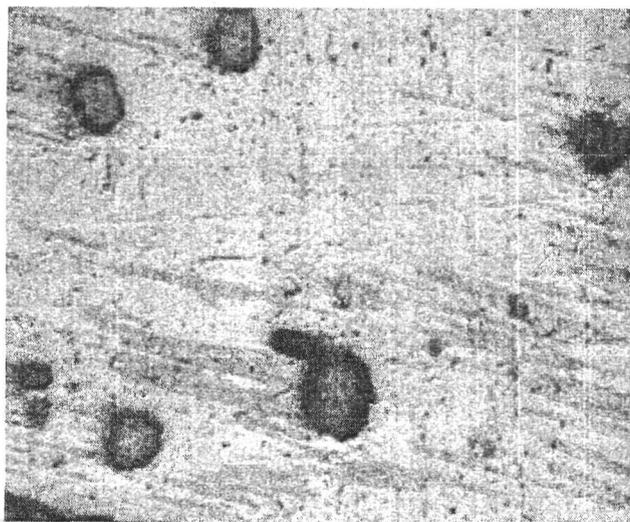
При увеличении степени деформации на смену случайным направлениям выпадающей фазы приходит ориентированное направление. Выпадение новой фазы (сорбита) происходит в местах, подвергшихся наибольшей деформации. Внешние усилия, как известно, вызывают деформацию в тех кристаллах, которые наиболее благоприятно ориентированы по отношению к направлению приложенной силы. Поэтому и распад аустенита начинается в этих отдельных зернах. И когда распад в них уже закончен, в смежных зернах иной ориентировки распад зачастую еще не начинается. Пластическая деформация ускоряет выпадение избыточных фаз из переохлажденного аустенита. Интенсивность выпадения карбидов в деформируемом образце больше, чем в недеформируемом.

Начало трооститного распада структуры стали сосредотачивается по границам зерен, однако резкое ускорение процесса связано также и с выпадением игольчатого троостита по плоскостям деформацион-

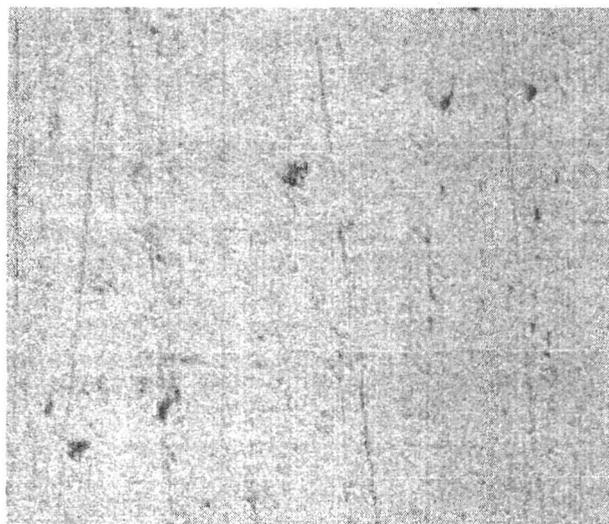
ных сдвигов. В связи с этим трооститные выделения получают резко ориентированное строение в виде параллельных игл.

Измельчение аустенита при деформации в районе высоких температур (900 °С и выше) оказывает количественное влияние на процесс распада в перлитном районе превращения, где скорость процесса зависит от размера зерна аустенита. Конечная структура стали гораздо дисперснее структуры исходного образца, не подвергшегося обкатке (рис. 6). Известно, что измельчение структуры приводит к повышению механических характеристик стали.

Рассматриваемая сталь относится к хромоникелевым, и ей присущ серьезный дефект, характерный для хромистых сталей, в виде флокенов, которые хорошо наблюдаются на макрошлифе. Флокены представляют собой в изломе пятна (хлопья), а в поперечном шлифе – трещины. По некоторым данным, флокены вызывает растворившийся в жидкой стали водород, который при температурах ниже 200 °С выделяется из раствора и создает сильные внутренние напряжения, приводящие к образованию флокенов [3]. Флокены можно устранить последующей деформацией, благодаря которой трещины завариваются, и более медленным охлаждением стали после горячей обработки, что и было реализовано в данном эксперименте – обкатке поверхности роликами при горячей непрерывно - последовательной высадке (рис. 7).



а)



б)

Рис. 7. Флокены в стали: а – нижний слой образца, прилегающий к оправке; б – верхний слой образца после обкатки роликами

#### Литература:

1 Голенков В.А. Технологические процессы обработки металлов давлением с локальным нагружением заготовки / В.А. Голенков, С.Ю. Радченко. – М.: Машиностроение, 1997. – 226 с.

2 Соловьев Д.Л. Деформационное упрочнение способом статико-импульсного нагружения // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2005. – № 10. – С. 3-6.

3 Гуляев А.П. Материаловедение. – М.: Машиностроение, 1988. – 647 с.

4 Тушинский Л.И. Методы исследования материалов / Л.И. Тушинский, А.В. Плохов, А.О. Токарев, В.И. Синдеев. – М.: Мир, 2004. – 383 с.

Канд. техн. наук Грядунова Е.Н.  
(Орловский государственный технический университет)  
Россия, г. Орел, тел. (4862)419872; E-mail: pmp@ostu.ru

## КИНЕТИЧЕСКОЕ УРАВНЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ В ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ РАВНОВЕСНОЙ СРЕДЕ

*The method of indication of substance of filling applied to the control of tightness products. In clause dynamics of process bromirovinq limiting hydrocarbons investigated. The limiting stage kinetic is certain and worked out the equation of distribution of particles of gas in the thermodynamic equilibrium environment. Minimal time of an establishment of stationary process is calculated.*

Надежность и долговечность многих видов современных изделий определяется качеством их герметизации. Контроль герметичности газонаполненных баллонов является неотъемлемым этапом производства этих изделий. Разработанный метод обнаружения натечки углеводорода позволяет обнаружить течь мощностью  $10^{-8}$  Вт [1].

Для описания динамики процесса бромирования предельных углеводородов, при натечке их в индикаторный раствор, прежде всего, следует определить, в какой области протекает реакция: кинетической или диффузионной.

Если скорость растворения и диффузии предельных водородов в водный раствор брома больше скорости вступления углеводорода в химическую реакции, то процесс протекает в кинетической области, то есть не зависит от скорости растворения и диффузии предельного водорода в жидкую фазу. При очень высокой скорости химической реакции диффузия углеводородов в жидкость может оказаться лимитирующей стадией – в этом случае динамика описывается диффузионными процессами.

Рассмотрим случай, когда скорость исчезновения углеводорода за счет химической реакции  $q_x$  (моль/с) и скорость диффузии газа  $q_d$  (моль/с) меньше натечки углеводорода  $q_y$  (моль/с). Тогда концентрация углеводорода в растворе постепенно повышается:

$$q_y = q_d + q_x. \quad (1)$$

Согласно [2], скорость изменения концентрации брома в растворе пропорциональна корню квадратному из концентрации реагирующего вещества:

$$W_y = \sqrt{\eta \cdot \frac{k_1}{k_2} \cdot C_y} = \sqrt{AC_y}, \quad (2)$$

где  $\eta$  – константа скорости химической реакции;  
 $k_1/k_2$  – отношение рекомбинированных радикалов брома к образовавшимся радикалам;  
 $C_y$  – концентрация углеводорода, моль/м<sup>3</sup>.

При фотометрическом иницировании данной реакции, отношение  $k_1/k_2$  является постоянной величиной, пропорциональной корню квадратному из интенсивности облучающего светового потока. Данное отношение, вычисленное Боденштейном и Линда, равно  $1,2 \cdot 10^{-9}$  моль/л·с [3].

Константа скорости химической реакции определяется по формуле:

$$\eta = \frac{K \cdot T}{h} \cdot \xi \cdot \exp\left(-\frac{G}{R \cdot T}\right), \quad (3)$$

где  $\xi$  – коэффициент экстинкции;  
 $K$  – постоянная Больцмана ( $K = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К);  
 $G$  – свободная энергия активации, Дж;  
 $T$  – температура, К;  
 $h$  – постоянная Планка, ( $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с);  
 $R$  – универсальная газовая постоянная ( $R = 8,3$  Дж/моль·К).

Константа скорости химической реакции брома с предельными углеводородами при температуре 25 °С равна для этана –  $2,1 \cdot 10^{-11}$  моль/м<sup>3</sup>·с, бутана –  $2,7 \cdot 10^{-11}$  моль/м<sup>3</sup>·с, пропана  $3,2 \cdot 10^{-11}$  моль/м<sup>3</sup>·с. Скорость химической реакции связана с изменением концентрации брома соотношением:

$$q_x = V_p \cdot W_y = V_p \sqrt{AC_y}, \quad (4)$$

где  $V_p$  – объем раствора.

Для раствора объемом  $10^{-6}$  м<sup>3</sup> с концентрацией пропана в нем  $10^{-3}$  моль/м<sup>3</sup>, скорость химической реакции составила 6,3 моль/с.

Скорость диффузии газа в раствор равна:

$$q_d = V_p \cdot \frac{dC_y}{dt}. \quad (5)$$

С учетом уравнений (4) и (5) выражение (1) примет вид:

$$q_y = V_p \cdot \frac{dC_y}{dt} + V_p \sqrt{AC_y}. \quad (6)$$

После перенесения первого слагаемого в левую часть и возведения обеих частей уравнения (6) в квадрат, оно примет следующий вид:

$$V_p^2 \cdot \frac{dC_y^2}{dt^2} - 2 \cdot V_p \cdot q_y \cdot \frac{dC_y}{dt} + q_y^2 = V_p^2 \cdot AC_y.$$

Перенесем слагаемое  $q_y^2$  в правую часть равенства,  $AC_y$  в левую и разделим выражение на  $V_p^2$ :

$$\frac{dC_y^2}{dt^2} - 2 \cdot \frac{q_y}{V_p} \cdot \frac{dC_y}{dt} - AC_y = \frac{q_y^2}{V_p^2}.$$

Решив данное дифференциальное уравнение, получим кинетическое уравнение распределения частиц газа в исследуемом растворе:

$$\frac{2q_y}{AV_p} \cdot \ln \frac{q_y}{V_p} - \frac{2}{A} \left[ -\frac{q_x}{V_p} - \frac{q_y}{V_p} \ln \left( \frac{q_y}{V_p} - \frac{q_x}{V_p} \right) \right] = t. \quad (7)$$

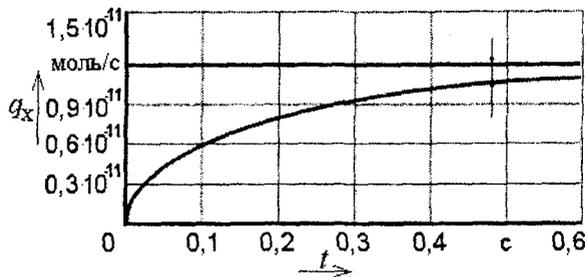


Рис. 1. Зависимость скорости химической реакции от времени

График вышеприведенной зависимости при фиксированной натечке  $q_y$  показан на рис. 1. Проинтегрировав уравнение (7), получим зависимость количества вступившего в реакцию предельного углеводорода от времени (этот график показан на рис. 2, причём кривая 1 соответствует течи мощностью  $2 \cdot 10^{-7}$  Вт, а кривая 2 –  $6 \cdot 10^{-7}$  Вт). Скорость химической реакции экспоненциально стремится к своему установившемуся значению, соответствующему состоянию утечки углеводорода. Процесс можно считать установившимся при скорости химической реакции, составляющей 0,01 от утечки углеводорода в раствор. Тогда время установления стационарного процесса  $t_c$  может быть теоретически вычислено по следующей формуле:

$$t_c = \frac{2q_y \ln \frac{q_y}{V_p}}{AV_p} - \frac{2(q_y - q_y \cdot 10^{-3}) \ln \left( \frac{q_y - q_y \cdot 10^{-3}}{V_p} \right)}{AV_p}. \quad (8)$$

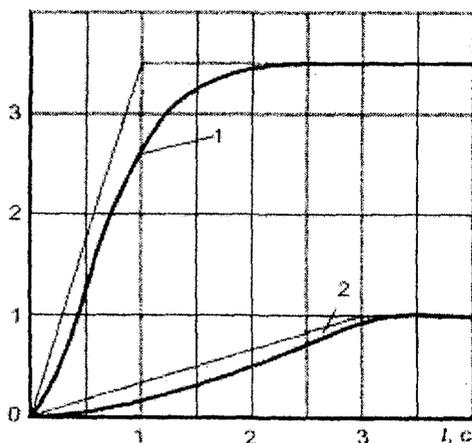


Рис. 2. Зависимость количества вступившего в реакцию углеводорода от времени при  $q_y > q_d$

При утечки пропана, соответствующей норме герметичности резервуара исследуемой термосистемы ( $10^{-11}$  моль/с) в раствор брома объемом  $10^{-6}$  м<sup>3</sup>, данное время приобретает значение  $t_c = 0,49$  с.

Рассмотрим случай, когда лимитирующей является диффузионная стадия процесса. Скорость диффузии газа в раствор определяется выражением [4]:

$$q_d = \beta \cdot F \cdot \Delta C, \quad (9)$$

где  $\beta$  – коэффициент диффузии газа в раствор;

$\Delta C$  – разность концентраций предельного углеводорода на границе раздела фаз;

$F$  – площадь раздела фаз в объеме жидкости, моль/м<sup>3</sup>.

Так как скорость реакции высока, и весь газ, поступивший в объём жидкости, сразу вступает в химическую реакцию с бромом, то его концентрация в объёме жидкости практически равна нулю. А концентрация газа в поверхностном слое равна максимальной растворимости данного газа в воде (для пропана  $1,75$  моль/м<sup>3</sup>). Таким образом, разность концентраций можно считать постоянной величиной, равной  $\Delta C = 1,75$  моль/м<sup>3</sup>. Минимальная площадь раздела фаз составляет:

$$F_{min} = \frac{\pi d_T^2}{4}. \quad (10)$$

При увеличении диаметра течи в  $n$  раз, скорость диффузии газа в жидкость увеличится в  $n^2$  раз. Зависимость количества газа, вступившего в реакцию, от времени при диффузионной стадии процесса показана на рис. 3. Экспериментальные исследования, проведенные на спектрофотометре СФ-46 с использованием контрольной течи мощностью  $2 \cdot 10^{-7}$  Вт, показали, что лимитирующей стадией процесса является его химическая стадия.

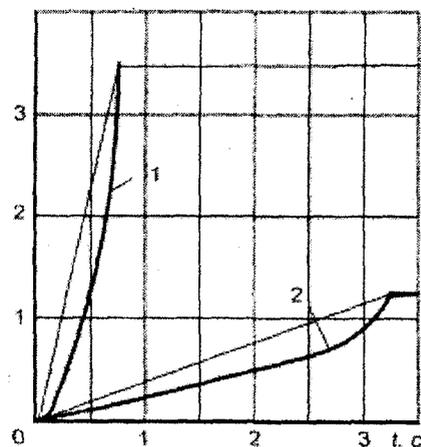


Рис. 3. Зависимость количества вступившего в реакцию углеводорода от времени при  $q_y < q_d$

**Литература:**

1 Патент № 2093807 Российская Федерация. МПК G 01 M 3/04. Способ обнаружения утечки. / С.Ф. Корндорф, Е.Н. Грядунова. – Опул. 1997.  
2 Марченко З.Н. Фотометрическое определение элементов. – М.: Мир, 1971. – 435 с.

3 Вилев А.В. Физические методы исследования в химии. – М.: Мир, 1974. – 346 с.  
4 Репке Г.Н. Неравновесная статистическая механика. – М.: Мир, 1990. – 320 с.

<sup>1</sup>Моисеев П.П., <sup>2</sup>Рожавский Э.И., <sup>3</sup>Драпезо А.П.

(<sup>1</sup>ПНН «АСТРОН ЭЛЕКТРОНИКА»; <sup>2</sup>СКБ КП ИКИ РАН; <sup>3</sup>ОИФТТП НАНБ)

<sup>1</sup>Россия, г. Орел; <sup>2</sup>Россия, Калужская обл, г. Таруса; <sup>3</sup>Республика Беларусь, г. Минск

## ПРИМЕНЕНИЕ МАЛОГАБАРИТНЫХ ДАТЧИКОВ УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ В СКАНИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВАХ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

*In given article is considered problem of the making the facility of the measurements of the angular position for scanning device of the cosmic systems.*

При разработке космических видеоинформационных систем (КВС), для обеспечения развертки изображения объекта съёмки, существует необходимость применения сканирующих устройств (СУ). Составной частью СУ является датчик углового положения сканирующего зеркала (ДУПСЗ). Космическое приборостроение выдвигает жесткие массогабаритные, энергетические, радиационные и точностные требования к применяемому оборудованию. В СУ применяются различные ДУПСЗ: интерферометрические, индукционные, оптические и др.

Интерферометрические датчики обеспечивают высокую точность измерений, но имеют большие габариты, сложность изготовления и настройки, небольшой рабочий ресурс, около 5 лет [1], невысокую радиационную стойкость (РС). Индукционные датчики имеют высокую точность измерений [2], большой рабочий ресурс, высокую РС, но при этом имеют значительный вес и габариты. Оптические датчики обеспечивают высокую точность измерений, средние габариты, но имеют малую РС.

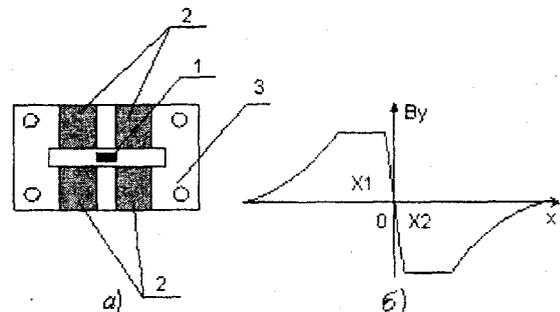
СУ КВС имеют СЗ небольшого размера и массы. Применение в таких устройствах крупногабаритных датчиков углового положения недопустимо. Поэтому существует необходимость применения малогабаритных ДУПСЗ, которые должны обеспечивать необходимую точность измерения, длительный ресурс в условиях высокого радиационного воздействия.

При разработке СУ видеоспектрометра ОМЕГА проекта МАРС-ЭКСПРЕСС был применен ДУПСЗ на датчике Холла (ДХ) [3]. СЗ диаметром 60 мм было установлено на торсионном подвесе и снабжено приводом для развертки изображения поверхности Марса. СУ обеспечивало 12 режимов сканирования, выбираемых автоматически, в зависимости от параметров орбиты. При изменении высоты полета угол сканирования менялся от  $\pm 0,275^\circ$  до  $\pm 2,2^\circ$ , скорость развертки от 1,7 град/с до 6,8 град/с.

Принцип работы ДУПСЗ СУ видеоспектрометра ОМЕГА основан на изменении ЭДС ДХ, наведенной в нем перемещающимся знакопеременным магнитным полем, создаваемым малогабаритной магнитной системой (МС). МС содержит высокоэнергетические постоянные магниты, установленные встречно-параллельно, с заданным промежутком между магнитами, как показано на рис. 1, а. На рис. 1, б показана характеристика изменения магнитной индукции в зазоре МС ДУПСЗ.

МС ДУПСЗ построена на постоянных магнитах размером  $4 \times 5$  мм<sup>2</sup>, установленных на расстоянии 1,5 мм друг от друга и имеющих воздушный зазор 1,5

мм для свободного перемещения ДХ. МС была установлена на СЗ. Распределение магнитной индукции МС в центре характеристики имело достаточно линейный участок X1-X2, что позволяло производить точные измерения малых угловых перемещений.



1 – ДХ; 2 – постоянные магниты; 3 – корпус МС

**Рис. 1.** МС ДУПСЗ (а) и характер распределения магнитной индукции в воздушном зазоре МС (б)

Датчик углового положения на элементе Холла позволил обеспечить точность измерения угла до  $\pm 10''$ , в пределах угла поворота СЗ  $\pm 2,5^\circ$ . Испытания показали, что температурная зависимость ДУПСЗ не превышает паспортных значений микросхем, используемых в интерфейсной схеме ДХ. Малая радиационная зависимость магнитов и ДХ позволяет использовать их в космическом приборостроении.

Применение ДУПСЗ на ДХ позволило значительно уменьшить габариты и массу СУ, упростить его конструкцию и юстировку. СУ в составе видеоспектрометра ОМЕГА с ДУПСЗ на ДХ длительное время работает на орбите Марса и обеспечивает выполнение требуемых параметров [4].

### Литература:

1 Вевюрко И.А. Прецизионный электропривод с интерферометрическим измерителем перемещений и цифровым программным управлением / И.А. Вевюрко [и др.] // Тр. ВНИИЭМ. – Т. 78. – С. 5-33.

2 Глаголев И.П. Двухканальный прецизионный преобразователь угла / И.П. Глаголев [и др.] // Измерительная техника, 1991. – №4. – С. 8.

3 Рожавский Э.И. Опыт разработки сканирующего устройства видеоспектрометра ОМЕГА с уменьшением его габаритов / Э.И. Рожавский, П.П. Моисеев, В.А. Котцов // Вопросы миниатюризации в современном космическом приборостроении. – Сб. докл. сем. ИКИ РАН. – М.: ИКИ РАН, 2005. – С. 104-111.

4 Vibration G.P. Perennial water ice identified in the south polar cap of Mars // Nature, 2004. – Vol. 428. – PP. 627-630.

ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ  
В БИОЛОГИИ И МЕДИЦИНЕ

УДК 681.2.082:615.849.19

Канд. техн. наук<sup>1</sup> Дунаев А.В., студ. Митюрин М.В., канд. физ.-мат. наук<sup>2</sup> Титов М.Н.,<sup>2</sup> Полянский С.В.  
(<sup>1</sup>Орловский государственный технический университет; <sup>2</sup>Фирма «Техника-Про»)

<sup>1</sup>Россия, г. Орел, тел. (4862)419876; E-mail: pms35@ostu.ru

<sup>2</sup>Россия, г. Москва, тел. (495)5454701; E-mail: gta@technica.msk.ru

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ И РАБОТЫ ПОРТАТИВНЫХ  
ЛАЗЕРНЫХ ТЕРАПЕВТИЧЕСКИХ АППАРАТОВ  
С ИМПУЛЬСНО-МОДУЛИРОВАННЫМИ  
РЕЖИМАМИ ИЗЛУЧЕНИЯ

*This article describes the main features of construction and work of portable laser therapeutic devices with pulse-modulated regime of radiation on example device "Creolka-M". It is showed that as a result of structural improvement the apparatus of series "Creolka" gets new functional possibilities. Using of different pulse-modulated radiations in one portable laser therapeutic device gives doctors big possibilities for comparing in medical process of various regimes of modulation and achievement of maximum therapeutically effect.*

Современные технологии дали человечеству портативные и простые в употреблении терапевтические лазеры. Применение полупроводниковых лазеров открыло новые возможности в низкоинтенсивной лазерной терапии (НИЛТ) благодаря существенному упрощению в обслуживании, отсутствию высокого напряжения (более 1000 В у газовых лазеров), миниатюрности устройства, автономности электрического питания (от аккумуляторов), возможности работать без световода [1].

Массогабаритные показатели аппаратуры далеко не всегда имеют решающее значение. Приоритетными чаще остаются характеристики, позволяющие получить наилучший лечебный эффект: универсальность, возможность изменения и контроля параметров излучения, простота управления и др. Проблема габаритов и массы аппарата возникает в случае, если требуется его систематическое перемещение, например:

– условия работы врача: на плавающем судне, на борту самолета, в передвижных амбулаториях, изолированных коллективах (поисковые отряды, экспедиции), в походно-полевых условиях и т.д. С подобной проблемой также сталкиваются сельские и частнопрактикующие врачи;

– если при периодическом врачебном контроле пациенты самостоятельно проводят процедуры. Это особенно актуально для тяжелых хронических больных, передвижение которых затруднено, а также больных, проживающих далеко от лечебных учреждений (лечение не прерывается в выходные и праздничные дни).

В подобных ситуациях очевидно преимущество портативных лазерных терапевтических аппаратов (АЛТ), имеющих минимальные габариты и массу, работающих как от сети (через адаптер), так и от батареек. Применение аккумуляторов иногда более желательно и удобно, но при этом необходимо помнить, что время работы аппарата даже с самыми

лучшими аккумуляторами намного меньше, чем аппаратов, работающих от батареек.

Интересно, что, с одной стороны, стремление к минимальным размерам приводит к потере универсальности и, как следствие для врача, сокращаются возможности НИЛТ, а с другой стороны, простота таких аппаратов даже более целесообразна, так как позволяет не беспокоиться о неправильном их применении пациентом самостоятельно. Практикующему врачу иногда вполне достаточно возможностей портативных АЛТ. Например, рефлексотерапевтам работать по точкам акупунктуры удобнее, если излучающая головка не «привязана» к базовому блоку: не мешают шнуры и постоянное отвлечение внимания на кнопку «Пуск». Параметры же воздействия в рефлексотерапии стабильны [2].

С проблемой размеров и массы аппаратуры, правда, в меньшей степени, приходится сталкиваться и в условиях стационара. Во-первых, удобно, если АЛТ размещается на тумбочке возле кушетки в стандартном боксе физиотерапевтического отделения и не требует перепланировки помещения под громоздкое устройство. Во-вторых, часто возникают ситуации, когда аппарат необходимо на время переместить, например, для проведения процедур в палатах стационаров, для аттестации, ремонта и т.д. Отсутствие проводов позволяет удобно работать руками врачу, удобно держать пациенту. Беспроводные приборы можно укреплять для работы на любых держателях, например с помощью манжеты.

Кроме того, все аппараты, содержащие лазерные источники, особенно полупроводниковые, очень чувствительны к колебаниям напряжения в сети электропитания. Изучение параметров питающей сети в медицинских учреждениях показывает, что имеются существенные отклонения от номинального значения напряжения, что связано как с резкими скачками последнего, так и с наличием в сети разнообразных импульсов и помех. В результате такой

нестабильности сети АЛТ часто выходят из строя из-за деградации лазерных диодов [3]. Отсутствие сети – полная независимость от величины напряжения и его стабильности в сети, стандарта на электрические розетки, расположение розеток в лечебном кабинете. Наличие портативного автономного аппарата, не привязанного к сетевому питанию, кардинально улучшает работу врача лазеротерапевта.

Ранее было разработано семейство портативных АЛТ «Креолка» (рис. 1): «Креолки» непрерывного и импульсного излучения, «Креолка И1» и «Креолка И2» (импульсное магнитное и лазерное излучение), «Креолка – лазерный душ», «Креолка ЛТ» (лазерное излучение и импульс тока), «Креолка – ВЛОК» (для внутривенной лазерной терапии), «Креолка – Косметолог», «Креолка – КВЧ».

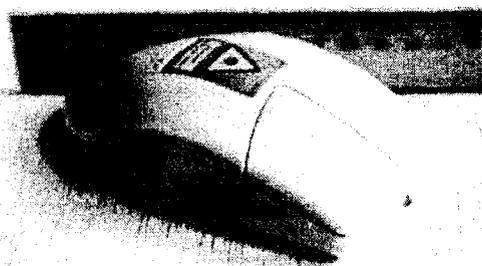


Рис. 1. Внешний вид АЛТ «Креолка»

Недостатками имеющихся АЛТ являются: наличие одного диапазона мощностей, частоты и отсутствие модуляции излучения. С учетом теоретических представлений и концепций, данных экспериментально-клинических исследований, нами создан на базе имеющихся «Креолок» новый тип, во многом отличающийся от предыдущих аналогов, – АЛТ «Креолка-М» – портативный лазерный терапевтический аппарат с разными импульсно-модулированными режимами излучения.

Лечение различных заболеваний с применением портативного лазерного терапевтического аппарата «Креолка-М» производится на основе методических рекомендаций, разработанных отечественными учеными и утвержденных Министерством здравоохранения Российской Федерации.

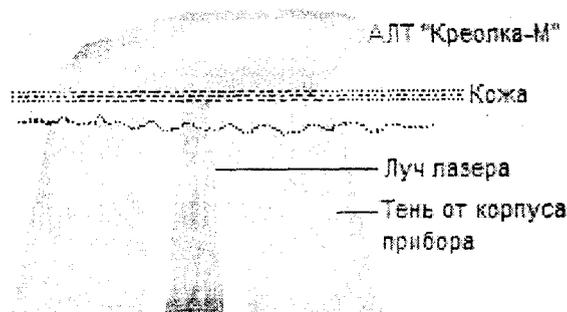


Рис. 2. Затемнение биологических тканей корпусом АЛТ «Креолка-М»

Таблица 1 – Технические характеристики АЛТ «Креолка-М»

№	Наименование параметра	Значение
1	Длина волны, мкм	0,65 – 0,66
2	Угол расхождения лазерного излучения: – в плоскости, параллельной p-n переходу, град. – в плоскости, перпендикулярной p-n переходу, град.	9 ± 3 29 ± 8
3	Мощность излучения в непрерывном режиме, мВт, (не менее)	5
4	Режим излучения	непрерывный/импульсно-модулированный
5	Частота модулирования, Гц	1,2; 2,4; 10
6	Класс опасности лазерного излучения (по ГОСТ Р 50723)	3А
7	Площадь светового пятна, см <sup>2</sup> (около)	5
8	Таймер, мин	4; 15
9	Питание	2 батареи типа ААА или от сети через сетевой адаптер 220/3 В
10	Ток потребления от батарей, мА (не более)	20
11	Время работы от 2-х батарей, ч (не менее)	50
12	Масса аппарата с батареями, г (не более)	100
13	Габаритные размеры, мм	120x60x35

Конструкция АЛТ «Креолка-М» обеспечивает создание выраженного контраста между ярко освещенным участком (место действия лазерного луча) и окружающей кожей, большая площадь которой закрыта корпусом прибора от внешнего освещения (рис. 2). Это позволяет преодолеть противоречие между методическими условиями достижения максимальной эффективности НИЛТ (создание максимального контраста между освещенным участком и окружающей кожей) и санитарными нормами безопасности при работе с лазерами (требуется хорошая освещенность кабинета лазерной терапии для того, чтобы зрачки глаз врача и пациента были достаточно сужены с целью защиты сетчатки глаза от засветки лазерным излучением). При

работе с АЛТ «Креолка-М» решены обе эти взаимоисключающие задачи. Благодаря такой конструкции прибора практически исключается переотражение света тканями в пространство (этот свет отражается обратно в ткани корпусом прибора). Плотность мощности имеет существенно больший смысл, чем только мощность источника воздействия. В результате этого пространственное распределение поглощенной энергии в среде становится более равномерным, что положительно влияет на развитие терапевтического эффекта НИЛТ.

Одной из особенностей АЛТ нового типа заключается в том, что первый режим (непрерывное излучение) полностью соответствует первому образцу серии «Креолка». В усовершенствованной модифи-

кации АЛТ «Креолка-М» переход из одного режима в другой заключается в том, что вместо одного электронного ключа, открывающего работу аппарата, имеется 4 разных электронных ключа, которые включают 4 разных режима работы АЛТ. Кроме обычного режима с непрерывным излучением, предусмотрено наличие еще трех режимов с разным импульсно-модулированным излучением частотами 1,2 Гц, 2,4 Гц и 10 Гц. Многочисленные исследования показали, что эти виды модуляций оказывают благоприятное лечебное действие [4]. Кроме того, в аппарате используется соответствующая световая и звуковая индикация при всех наборах кодов выбора режимов и времени излучения. Характеристики портативного АЛТ «Креолка-М» приведены в таблице 1.

Рассмотрим особенности построения и конструкции портативного АЛТ «Креолка-М», структурная схема которого представлена на рис. 3.



Рис. 3. Структурная схема АЛТ «Креолка-М»

В данном АЛТ с помощью кнопок управления (кнопки тактовые) в микроконтроллере (например, серии PIC) выбирается часть алгоритма, соответствующая выбранному режиму работы. При этом, в зависимости от выбранного режима и времени работы, блок звуковой индикации, представленный пьезоэлектрическим излучателем звука (пьезозуммером), издает определенное количество кратковременных сигналов, а блок световой индикации, представлен-

ный двухцветным светоизлучающим диодом, мигает соответствующим светом. Сигнал с микроконтроллера поступает на блок сопряжения, в котором формируется управляющий сигнал для лазерного диода (например, серии RLD или HL). Блок питания представлен батарейным отсеком на 2 батареи типа ААА и гнездом для сетевого адаптера, предусмотренным для работы от сети через сетевой адаптер на 3 В.

Таким образом, в результате конструктивных усовершенствований портативный лазерный аппарат серии «Креолка» приобрел новые функциональные возможности. Применение разных импульсно-модулированных излучений в одном портативном АЛТ дает врачам огромные возможности для сравнения в лечебном процессе разных режимов модуляции и достижения максимального терапевтического эффекта.

#### Литература:

- 1 Дунаев А.В. Лазерные терапевтические устройства: учебное пособие / А.В. Дунаев, А.Р. Евстигнеев, Е.В. Шалобаев; под ред. К.В. Подмастерьева. – Орел: ОрелГТУ, 2005. – 143 с.
- 2 Москвин С.В. Эффективность лазерной терапии. – М.: НПЛЦ «Техника», 2003. – 256 с.
- 3 Богданов Д.П. Влияние сети на существенное снижение надежности аппаратов лазерной медицины / Д.П. Богданов, В.Н. Заварзин, А.А. Радаев, С.В. Полянский, М.Н. Тутов // Материалы XVIII Междунар. науч.-практ. конф. «Применение лазеров в медицине и биологии». – Ялта: «Лазер и здоровье», 2002. – С. 68.
- 4 Buylin V.A. Low-intensity laser therapy of various diseases / V.A. Buylin, S.V. Moskvina. – Moscow: 2001. – 172 p.

УДК: 612.014.462.9

Канд. биол. наук Бобров А.В.

(Орловский государственный технический университет)

Россия, г. Орел, тел. (4862)419876; E-mail: pms35@mail.ostu.ru

## РЕГИСТРАЦИЯ СЛАБЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ НА ДВОЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЛОЯХ

*In a model investigation being carried out with the aim of a mechanism of activated water influence upon vital functions of living organism, as a system model of membrane neighboring double electric layers (DEL) of a biological membrane there was used a system of electrode neighboring DEL, so-called "current electrode system". Having a source of electromotive force (EMF). In the area of experiments along with changes of inter-electrode current arising as a result of a field affect of non-activated and activated water there were registered parameter changes of self-oscillating (SO) process excited in an electrode system. There is registered a sharp increase of efficiency in a field effect of the water own information field on physical-chemical processes proceeding in electrode system as a result of water activation.*

#### Введение

Систематическое исследование таинственного высокопроницающего неэлектромагнитного компонента излучения человека (ВНКИЧ) началось срав-

нительно недавно. В 70-х годах прошлого столетия Клив Бакстер – директор Института криминологии (США) впервые использовал для регистрации ВНКИЧ биологические детекторы – растения. С по-

мощью установленных на них двух металлических электродов снималась разность электрических потенциалов между двумя точками на поверхности листа, которая после усиления регистрировалась.

В 1983 г. в СССР появились первые преобразователи ВНКИЧ – электродные системы (ЭС), в которых сенсорными элементами служили приэлектродные двойные электрические слои (ДЭС) [1]. Позже (1986 г.) были созданы преобразователи на полупроводниковых интегральных микросхемах (ИМС) [2]. В 1989 г. было обнаружено, что преобразователи на ДЭС и ИМС могут быть использованы для регистрации торсионных полей (ТП), индуцируемых генераторами ТП, созданными в МНТЦ ВЕНТ.

**Преобразователи на ДЭС**

Предъявляемые к детекторам на двойных электрических слоях требования чувствительности и стабильности определили необходимость изучения сенсорных свойств ДЭС и поиска путей совершенствования тактико-технических характеристик преобразователей, основанных на этих свойствах.

Двойной электрический слой, возникающий на поверхности раздела двух фаз, обладает уникальными сенсорными свойствами. Чувствительность ДЭС к воздействию физических факторов – электромагнитному излучению (ЭМИ), переменным магнитным полям (ПЕМП), и акустическому (звук, ультразвук) – равна или превышает чувствительность всех известных естественных (в том числе биологических) объектов. Реакции на воздействие ЭМИ на частоте 550 кГц и переменными магнитными полями регистрировались при плотности потока мощности  $10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup> [1, 3-6]. Реакция на воздействие звука возникала при интенсивности  $10^{-13}$  Вт/м<sup>2</sup> или ниже [5]. ДЭС отвечают реакцией на воздействие ЭМИ в дециметровом диапазоне волн [7], на воздействие ВНКИЧ [8], воздействие торсионного генератора разработки МНТЦ ВЕНТ [9] и на обнаруженный в 1997 г. неэлектромагнитный компонент излучения квантовых генераторов [9, 10].

Свойство ДЭС отвечать изменением электрического потенциала на воздействие факторов внешней среды можно легко объяснить с позиции классической теории, согласно которой ДЭС, возникающий на поверхности раздела двух фаз, можно представить как заряженную емкость  $C$ , равную сумме двух последовательно соединенных емкостей с зарядом  $q = \rho S$ , ( $\rho$  – плотность зарядов, а  $S$  – площадь ДЭС) и потенциалом  $\varphi$  относительно жидкой среды:

$$\varphi = q/C, \tag{1}$$

$$C = \frac{C_{Гельм} \cdot C_{Гуи}}{C_{Гельм} + C_{Гуи}}, \tag{2}$$

где  $C_{Гельм}$  – емкость адсорбционного слоя (слоя Гельмгольца);

$C_{Гуи}$  – емкость диффузионного слоя (слоя Гуи).

Из выражения (1) следует, что величина потенциала ДЭС при постоянном заряде определяется изменением емкости  $C$  на величину  $\Delta C$ .

В электродной системе (ЭС) с металлическими электродами и бидистиллированной водой в качестве жидкой фазы потенциал приэлектродных ДЭС

является функцией потенциалов слоев Гуи и Гельмгольца (рис. 1). В действительности величина слоя Гельмгольца определяется адсорбционными процессами и не изменяется. Только потенциал слоя Гуи может варьировать под воздействием внешних факторов. Таким образом, при неизменяющемся заряде, в первом приближении, реакция ДЭС на воздействие фактора внешней среды – результат изменения значения диэлектрической проницаемости в слое Гуи.

Рассмотрим зависимость величины потенциала слоя Гуи от различных факторов.

Потенциал слоя Гуи определяется из выражения:

$$\varphi(x) = \varphi_{\delta} \cdot e^{-\frac{|x-\delta|}{\lambda}}, \tag{3}$$

где:  $\delta$  – толщина слоя Гельмгольца;

$\varphi_{\delta}$  – граничный потенциал между слоями Гельмгольца и Гуи;

$\lambda$  – толщина слоя Гуи;

$x$  – текущая координата с началом отсчета от поверхности электрода.

На границе с жидкой фазой величина потенциала ДЭС и слоя Гуи становится равной потенциалу жидкой фазы, который принимается равным нулю. При малых значениях  $\varphi_{\delta}$  толщина слоя Гуи зависит от температуры, заряда ионов, их концентрации и диэлектрической проницаемости среды в этом слое:

$$\lambda = \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot R \cdot T}{2 \cdot F^2 \cdot J}} = K \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot T}{\sum n_{oi} \cdot z_i^2}}, \tag{4}$$

где:  $\varepsilon_0$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума (электрическая постоянная);

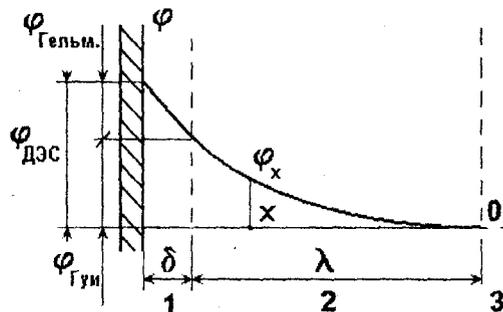
$\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость в слое Гуи;

$F$  – число Фарадея;

$z$  – заряд  $i$ -го сорта ионов в жидкой фазе;

$n$  – концентрация  $i$ -го сорта ионов в слое Гуи;

$J$  – ионная сила раствора.



1 – адсорбционный слой (слой Гельмгольца)  
2 – диффузионный слой (слой Гуи); 3 – жидкая фаза

**Рис. 1. Распределение потенциала в ДЭС**

Таким образом, в ЭС – преобразователях на ДЭС, при соблюдении режима стабильной температуры, потенциал слоя Гуи представляет собой функцию диэлектрической проницаемости среды в этом слое. Как известно, диэлектрическая проницаемость среды определяется поляризуемостью составляющих ее элементов и фактором внутреннего поля, учитывающим взаимодействие диполей друг с другом и их пространственную ориентацию. В простейшем случае, когда все частицы имеют одинаковую поляри-



зуюмость и одинаково расположены в диэлектрике, его проницаемость равна:

$$\varepsilon = 1 + 4\pi n \alpha C_i, \quad (5)$$

где:  $n$  – концентрация частиц;  
 $\alpha$  – поляризуемость;  
 $C_i$  – структурный коэффициент внутреннего поля.

В свою очередь, поляризуемость  $\alpha$  включает в себя два компонента: ориентационный, характеризующий ориентацию диполей в веществе, и концентрационный, учитывающий плотность вещества.

Как следует из уравнения (5), при сжатии или растяжении слоя Гуи (при звуковом или ультразвуковом воздействии) величина диэлектрической проницаемости изменяется в результате изменения концентрации в единице объема всех сортов ионов в этом слое. Одновременно изменяется и протяженность  $\lambda$  самого слоя Гуи – эффективное расстояние между «обкладками» заряженной емкости. Аналогичные изменения происходят и в адсорбционном слое, однако здесь они крайне незначительны вследствие его малой протяженности – диаметров всего нескольких находящихся в растворе ионов.

Из сказанного следует: в результате акустического воздействия изменение электрического потенциала слоя Гуи при неменяющемся заряде происходит за счет изменения концентрации вещества  $n$  и за счет изменения протяженности слоя Гуи.

Реакцию ДЭС на электромагнитное (ЭМ) воздействие можно объяснить взаимодействием электрических диполей с электрической составляющей ЭМ излучения, приводящим к переориентации диполей.

Как известно, в электрическом поле, изменяющемся с частотой  $\omega$ , диэлектрическая проницаемость среды с ориентационной поляризацией проявляет себя как комплексная величина [11]:

$$\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon'', \quad (6)$$

Согласно формулам Дебая,  $\varepsilon'$  и  $\varepsilon''$  равны:

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty - \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2 \cdot \tau^2}, \quad (7)$$

$$\varepsilon'' = \frac{(\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty) \cdot \omega \cdot \tau}{1 + \omega^2 \cdot \tau^2}. \quad (8)$$

где:  $\varepsilon_0$  – значение  $\varepsilon$  для низких частот ( $\omega \ll 1/\tau$ );  
 $\varepsilon_\infty$  – значение  $\varepsilon$  для высоких частот ( $\omega \gg 1/\tau$ );  
 $\tau$  – время поляризации диэлектрика (время релаксации).

В зависимости от частоты действующего ЭМ поля возможны разные виды поляризации в слое Гуи – резонансная или ориентационная, приводящие к различным значениям  $\varepsilon'$  и  $\varepsilon''$  и, следовательно, к различной величине отклика приэлектродных ДЭС на такое воздействие.

Из всего сказанного следует, что потенциал ДЭС зависит от факторов внешней среды – температуры, электрических и электромагнитных полей, а также от акустического воздействия, способного создавать поле сил (давление или растяжение) в слое Гуи. Данные факторы влияют на значение диэлектрической проницаемости в этом слое, вызывая переориентацию полярных молекул, изменение плотности среды и его протяженности.

Воздействие внешнего торсионного поля на ДЭС, в результате спин-торсионного взаимодействия с характеристическим полем вещества (спиновой системой, образуемой всеми компонентами ДЭС) должно приводить к изменению физических характеристик вещества, в том числе диэлектрической проницаемости среды [12].

Описанные свойства позволили создать преобразователи (детекторы) для регистрации перечисленных выше факторов.

Главным условием эффективной работы преобразователей на ДЭС является неравенство параметров приэлектродных ДЭС – их асимметрия.

Степень асимметрии определяет чувствительность ЭС. Другие характеристики электродной асимметричной системы (ЭАС) в большей степени зависят от ее типа – способа создания асимметрии, материала электродов, состава жидкой фазы и т.д.

Условие неравенства параметров приэлектродных ДЭС определяется следующим. В электродной системе на поверхности раздела жидкой и твердой фазы у поверхности электродов возникают ДЭС с потенциалами  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  относительно объема жидкой фазы, удаленного от электродов. В результате, между электродами устанавливается разность потенциалов:

$$U = \varphi_2 - \varphi_1. \quad (9)$$

Воздействие фактора внешней среды изменяет потенциалы  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  на величины  $\Delta\varphi_1$  и  $\Delta\varphi_2$ , соответственно, что приводит к изменению разности потенциалов электродной системы  $U$  на величину  $\Delta U$ :

$$\begin{aligned} &(\varphi_2 + \Delta\varphi_2) - (\varphi_1 + \Delta\varphi_1) = \\ &= (\varphi_2 - \varphi_1) - (\Delta\varphi_2 - \Delta\varphi_1) = U + \Delta U, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $\Delta U$  – реакция ЭАС на воздействие внешнего фактора.

Как следует из выражения (10), необходимым условием для регистрации этой реакции является асимметрия ЭАС  $\Delta\varphi_1 \neq \Delta\varphi_2$ , обеспечивающая неравенство нулю величины  $\Delta U$ .

В ЭАС конечных размеров внешний фактор воздействует одинаково на оба электрода. Поэтому условие (10) может быть выполнено только при несопадении одного или нескольких параметров приэлектродных ДЭС. Из анализа выражения (10) следует: детекторы на ДЭС не регистрируют абсолютные значения интенсивности действующего фактора.

#### **Типы асимметричных электродных систем**

Все существующие типы ЭАС, состоят, как правило, из двух металлических электродов, находящихся в контакте с полярной жидкостью (например, бидистиллированной водой). Неравенство параметров в них достигается следующими способами:

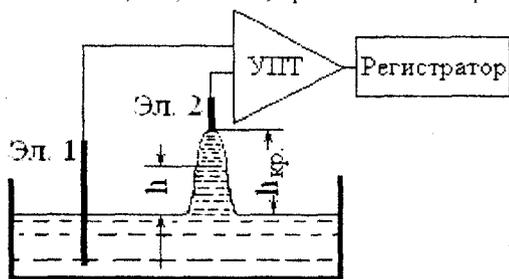
- 1) вытягиванием столба жидкости под одним из электродов [1,6];
- 2) применением остеклованного электрода со сформированной геометрией ДЭС [5,6];
- 3) формированием ионного состава приэлектродных ДЭС в «токовых датчиках» [4, 5, 6].

**Способ 1. Электродная система с вытянутым столбом жидкости.** В сосуд с жидкостью на глубину 2...5 мм погружен металлический, например,

платиновый электрод Эл. 2 (рис. 2). На расстоянии 5...15 мм от него на поверхность жидкости опущен электрод Эл. 1 из аналогичного материала. После установления контакта с жидкостью электрод Эл. 1 приподнимается микрометрическим винтом на некоторую высоту  $h_{кр} - h$  ( $h_{кр}$  – высота столба жидкости, при которой происходит его отрыв от электрода).

С увеличением  $h$  в ДЭС, возникшем у поверхности электрода Эл. 1 в результате растяжения жидкости под воздействием собственного веса, происходит изменение диэлектрической проницаемости среды, что является одной из двух причин, обуславливающих отличие емкости ДЭС под электродом Эл. 1 от емкости ДЭС, возникшего у поверхности электрода Эл. 2. Другая причина заключается в различии их геометрии. По мере вытягивания столба жидкости влияние обоих факторов будет возрастать. При  $h = h_{кр}$  степень асимметрии приэлектродных ДЭС и чувствительность ЭС максимальны.

ЭС с вытянутым столбом жидкости обладают рядом недостатков. Она неустойчива во времени: по мере испарения жидкости ее уровень в сосуде снижается, вследствие чего столб жидкости непрерывно увеличивается, что, в итоге, приводит к его обрыву.



$h$  и  $h_{кр}$  – высота и критическая высота столба жидкости; УПТ – усилитель постоянного тока

**Рис. 2. Электродная система с вытянутым столбом жидкости в составе устройства для регистрации торсионного излучения**

Другой ее недостаток заключается в значительных по величине флуктуациях регистрируемого сигнала – «шумах», обусловленных микровибрациями сосуда с жидкостью. К недостаткам системы относится также наличие механического подъемного устройства с микровинтом, работа с которым требует определенных навыков.

**Способ 2. ЭС с остеклованным электродом.** Асимметрия достигается изменением геометрии ДЭС. Для этого один из электродов, за исключением его торцевой поверхности, покрывается изоляцией из стекла. Плоский проводящий торец электрода после зачистки погружается в жидкость или устанавливается на ее поверхность. Недостаток этого метода заключается в нестабильности, обусловленной постепенным проникновением жидкости под слой изоляции, изменяющей геометрию ДЭС.

**Способ 3. «Токовая» электродная система.** С конца 80-х годов нами изучалась реакция на воздействие различных физических факторов электролитической ячейки, в которой в качестве жидкой фазы использовалась бидистиллированная вода. Асимметрия такой ЭАС обусловлена наличием двух разнонаправленных слабых (от долей до нескольких десят-

ков мкА) ионных потоков. Величина потоков и, следовательно, состав и концентрация противоположных по знаку ионов в приэлектродных областях ЭАС определяется, в частности, разностью потенциалов включенного в цепь источника ЭДС. Поскольку реакция ЭАС такого типа на воздействие внешнего фактора выражается изменением величины межэлектродного тока  $I$  относительно его среднего значения на величину  $\Delta I$ , она названа «Токовой».

В «Токовой» ЭС асимметрия приэлектродных ДЭС достигается путем формирования их ионного состава. Электродная система включается последовательно в замкнутую цепь с источником ЭДС и нагрузочным резистором  $R_n$  (рис. 3). При прохождении по цепи тока  $I$  на концах резистора возникает падение напряжение  $U = I \cdot R_n$ , которое подается на входы усилителя постоянного тока. Силу тока в цепи определяют по показаниям микроамперметра.

Под воздействием разнополярных потенциалов, приложенных к электродам, к ним устремляются противоположные по знаку ионы с равными по величине зарядами, образовавшиеся в результате диссоциации воды, перехода в нее компонентов твердой фазы и т.д., формирующие приэлектродные ДЭС. Асимметрия этих ДЭС обусловлена различным по природе ионным составом, его количественными и зарядовыми характеристиками.

#### **Автоколебательный процесс – второй компонент реакции детекторов на ДЭС**

Эффективность работы «Токовых» датчиков можно значительно повысить путем создания определенных условий, при которых в системе приэлектродных ДЭС возникает автоколебательный (АК) процесс, чрезвычайно чувствительный к воздействию внешних факторов.

Основным параметром, определяющим возникновение автоколебаний, является величина межэлектродного тока (МТ), регулировка которого осуществляется путем варьирования разности потенциалов на выходах источника ЭДС. С увеличением МТ от 1-2 до 8-12 мкА начинают заметно возрастать его флуктуации и чувствительность «Токовой» ЭС к воздействию внешних факторов. При дальнейшем увеличении МТ флуктуации переходят в упорядоченные колебания. Область существования АК-процесса в исследованной нами «Токовой» ЭС, составляла 15-18 мкА. Нижнее значение порогового МТ составило 8-9 мкА. Верхнее значение тока, при котором его колебания прекращаются – порядка 2-28 мкА.

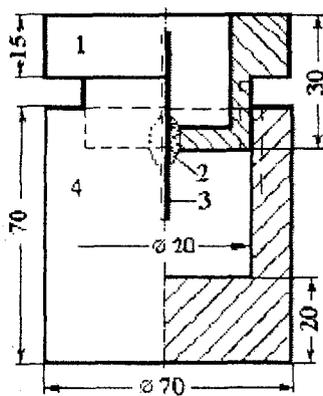
Изменение основных параметров АК-процесса – амплитуды и частоты колебаний, возникающее в ответ на внешнее воздействие, является вторым – «частотным» компонентом реакции «Токовой» ЭС.

В зависимости от материала электродов период АК исчислялся минутами или десятками минут, а их амплитуда соизмерима с собственными шумами системы до возникновения в ней АК-процесса, или превышает их во много раз.

Воздействие факторов внешней среды приводит к изменению периода колебаний и их амплитуды, причем такие изменения возникают при меньшем времени экспозиции и раньше, чем возникает «аналоговый» компонент реакции ЭАС. Они, по суще-

ству, совпадают с началом воздействия, однако по ним нельзя судить о его интенсивности. Второй – «частотный» компонент «Токового» детектора при регистрации слабых и сверхслабых излучений может быть использован только как индикатор.

АК-феномен, обнаруженный в 1988 г. и подробно описанный в 1992 г. [4], сыграл исключительную роль в последующих исследованиях. Их результатом явилось обнаружение в 1997 г. торсионного компонента излучения квантовых генераторов [9, 10].

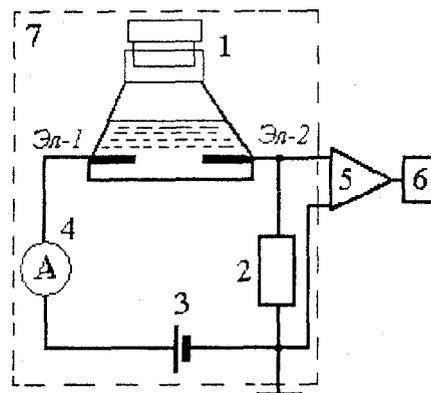


1 – крышка; 2 – стеклянный изолятор; 3 – платиновый электрод; 4 – корпус (второй электрод, выполненный из нержавеющей стали)

а)

На рис. 4, а приведен пример реакции автоколебательного процесса на так называемое «волевое» воздействие человека продолжительностью 7 мин. В результате воздействия резко изменились основные параметры АК-процесса: период АК возрос втрое, а амплитуда – более чем в два раза.

На рис. 4, б приведен результат физического эксперимента, в котором впервые был обнаружен торсионный компонент, индуцируемый квантовыми генераторами.



1 – датчик; 2 – резистор нагрузки; 3 – источник ЭДС; 4 – микроамперметр; 5 – усилитель постоянного тока; 6 – регистратор; 7 – экранирующая камера

а)

**Рис. 3. «Токовая» асимметричная электродная система: а – конструкция датчика; б – схема включения датчика и блок-схема установки для исследования реакции ЭАС на воздействие физических факторов**

#### Компьютеризованный комплекс

В 1992 г. был создан компьютеризованный комплекс, включающий четыре датчика на ДЭС. Предусмотрена компьютерная обработка и просмотр в масштабе реального времени поступающей от них информации, корреляционной кривой, полученной по двум независимым каналам, и кривой усреднения информации. Использование метода корреляционного анализа при исследовании реакции на воздействие сверхслабых факторов позволило на 1 – 1,5 порядка повысить отношение «сигнал/шум» на выходе системы (рис. 5). Применение компьютерной техники значительно расширило возможность использования детекторов на ДЭС и повысило эффективность их работы при исследовании реакции на воздействие сверхслабых факторов [13].

С применением компьютеризованного комплекса в 2004 г. проводились эксперименты, целью которых являлось подтверждение представлений о существовании собственных, так называемых «характеристических» полей объектов живой и косной материи. В задачу исследований входило также подтверждение полевой концепции механизма действия активированной воды на биологические объекты [12].

#### Рецепторная функция ДЭС

Прежде чем перейти к дальнейшему рассмотрению экспериментальных результатов с применением детекторов на ДЭС, рассмотрим участие и роль двойных электрических слоев в жизнедеятельности биологических объектов.

ДЭС являются атрибутом биологических тканей. Примембранные ДЭС, расположенные по обе

стороны фосфолипидной мембраны, образуют с ней единый комплекс. Гидрофобная область мембраны представляет собой твердую фазу; жидкая фаза – вода – проникает в гидрофильную область и частично совмещена с ней.

В то же время ДЭС сохраняют все присущие им признаки: они обладают собственными характеристиками (пространственной протяженностью, зарядом, потенциалом), свойствами (например, сенсорным) и выполняют специфически присущую им рецепторную функцию, обуславливающую синхронные реакции на уровне организма клеток и субклеточных структур на воздействие факторов окружающей среды. На основании сказанного в 1989 г. высказана гипотеза, согласно которой ДЭС, широко представленные в тканях биологических объектов, осуществляют неспецифическую рецепцию факторов окружающей среды [14, 15].

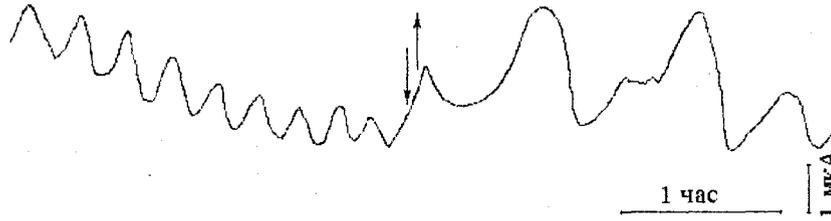
Система приэлектродных ДЭС в «Токовой» ЭС является моделью системы примембранных ДЭС в тканях биологических объектов, в которых источником ЭДС является мембранный потенциал, поддерживаемый работой  $K^+Na^+$  насосов. Протекающему в «Токовой» системе межэлектродному току адекватен ток ионов, переносимых через мембрану.

Примембранные ДЭС, расположенные по обе стороны биологической мембраны, должны играть значительную роль в ее функционировании. В частности, они участвуют в переносе веществ через мембрану и ее поляризации [16].

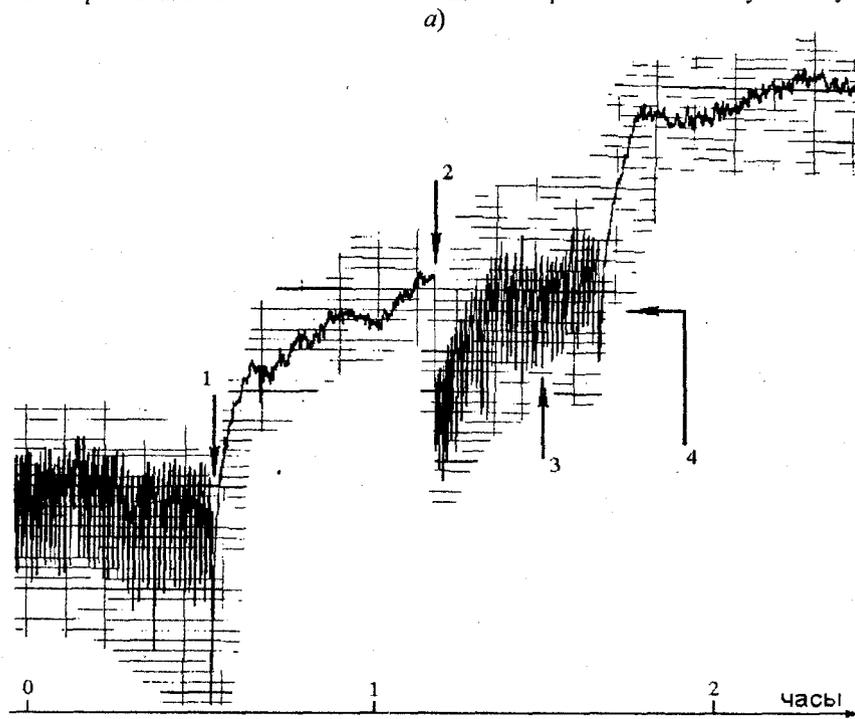
По мнению Богуславского [17], особенно высокая роль примембранных ДЭС, без которых невозможно осуществление многочисленных функций

биологических мембран (БМ). Согласно существующим представлениям, ДЭС не только ощутимо влияют на свойства и активность БМ, но принимают непосредственное участие в присущих биологическим (в том числе цитоплазматическим) мембранам массо- и электрообменных процессах, переносе через мембрану диссоциированных и нейтральных молекул, протонов и электронов. Другими словами, ДЭС участвуют практически во всех фундаментальных процессах жизнедеятельности – дыхании животных, утилизации энергии света растениями и

солелюбивыми бактериями, в окислительно – восстановительных реакциях, синаптической передаче и т.д. Из всего вышесказанного следует, что обнаружение реакции «Токовой» ЭС на дистантное полевое воздействие торсионного источника (в том числе, собственных характеристических полей объектов живой и неживой природы), должно явиться одновременно доказательством полевой природы механизма реакции биологических объектов на такое воздействие.



волевое воздействие производилось из смежного помещения через железобетонную стену толщиной 40 см



Автоколебания возникли в результате воздействия на один из электродов через стенку стеклянного стакана лучом гелиевого лазера. Через 3,5 часа лазер был выключен, что явилось причиной срыва АК (поз. 1). После повторного включения лазера АК возобновились (поз. 2) и продолжались при перекрытии луча непрозрачным экраном (поз. 3). Поворот лазера на 90° относительно вертикальной оси привел к срыву АК (поз. 4).

**Рис. 4. Примеры реакции автоколебательного процесса на воздействие различных факторов внешней среды: а – изменение параметров АК-процесса в результате волевого воздействия оператора с экспозицией 7 мин; б – результаты эксперимента, в котором впервые был обнаружен второй (неэлектромагнитный) компонент излучения квантовых генераторов**

Целью исследований 2004 г. являлось экспериментальное подтверждение существования характеристических ТП. Эксперименты проводились с применением детекторов на ДЭС, входивших в состав компьютеризованного комплекса. Сравнивались реакции «Токовых» датчиков на воздействие пустого стеклянного сосуда и сосуда, заполненного образцами неактивированной и активированной воды.

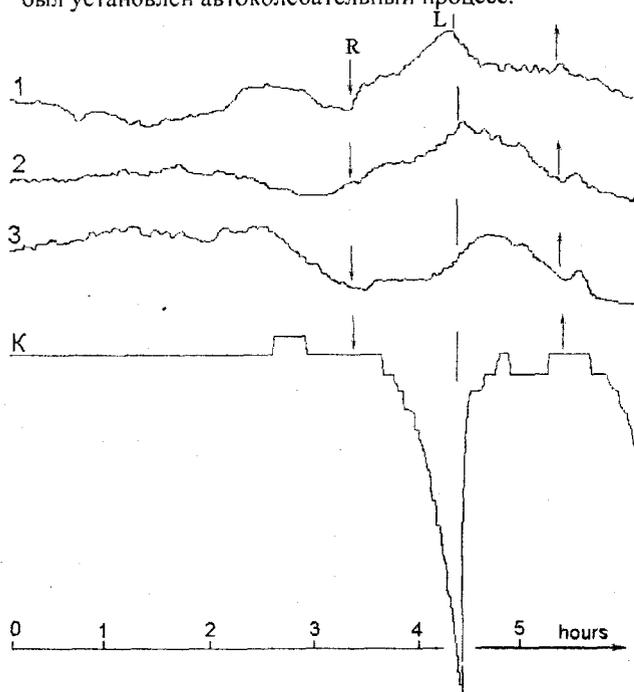
Активация воды производилась путем информационного воздействия торсионного компонента излучения, исходившего от светодиодного излуча-

теля, пропущенного через вещество информационной матрицы – пенициллин.

Детекторы и экспериментальные образцы располагались в стенном шкафу, исключая быстрые температурные перепады. Расстояние между детекторами составляло 3...4 см. Пустой сосуд устанавливался на заданном расстоянии  $S = 5...75$  см от детекторов, где он оставался на протяжении всего эксперимента. После окончания регистрации реакции на воздействие пустого сосуда, в него заливалось 300 мл одного из экспериментальных образцов

– отстоявшейся (1 сутки при комнатной температуре) водопроводной неактивированной или активированной воды. Заполнение сосуда производилось следующим образом – сразу после удаления первого образца или спустя некоторое время.

На рис. 6 приведены синхронные реакции двух «Токовых» детекторов на воздействия характеристических полей пустого стеклянного сосуда и этого же сосуда, содержащего неактивированную воду, и воду, подвергнутую информационному воздействию. В эксперименте, приведенном на рис. 6, а, регистрировалось изменение средней величины межэлектродного тока в обоих детекторах; в эксперименте, приведенном на рис. 6, б и в, во втором детекторе был установлен автоколебательный процесс.



К – корреляционная кривая для датчиков 1 и 2. Стрелкой, обращенной к кривой, обозначено начало воздействия; от кривой – его окончание. Прямой линией обозначена смена воздействия правым ТП на воздействие левым.

**Рис. 5. Реакция датчиков 1-3 на воздействие правым (R) и левым (L) торсионным полем, индуцированным генератором МНЦ ВЕНТ**

В серии экспериментов с неактивированной водой и с водой, подвергшейся информационному воздействию, во всех случаях реакция обоих детекторов на воздействие активированной воды значительно превышала величину реакции на воздействие неактивированной воды. Из этих результатов следовало: все объекты обладают собственными характеристическими ТП. Характеристические ТП взаимодействуют между собой. Интенсивность информационного воздействия зависит от модальности (информационного наполнения) воздействующего ТП.

В следующей серии экспериментов один из двух детекторов регистрировал «аналоговый» компонент реакции электродной системы; второй детектор – «частотный» компонент. Как видно на рис. 6, б и в, реакция детекторов на воздействие образца активированной воды приводит к значительным измене-

ниям средней величины тока и параметров АК-процесса. Реакция обоих «Токовых» датчиков на воздействие неактивированной воды, как и в опыте, приведенном на рис. 6, а, значительно слабее.

Таким образом, использование в «Токовых» детекторах АК-процесса позволяет по изменению его параметров с большей степенью достоверности судить о наличии реакции на воздействие слабых характеристических ТП неактивированной и активированной воды даже в случае, если реакция «аналогового» датчика представляет собой лишь незначительные по величине флуктуации средней величины межэлектродного тока.

По итогам экспериментов можно заключить: интенсивность информационного воздействия характеристического поля воды на происходящий в «Токовой» ЭС физико-химический АК-процесс определяется ее модальностью (информационным наполнением). Информационное наполнение активированной воды выше наполнения неактивированной – информационное воздействие на воду усложняет ее макроструктурные образования, одновременно снижая их стабильность. Квазистабильные макроструктурные образования активированной воды спустя 15-25 суток переходят в метастабильное состояние с пониженным информационным наполнением [18, 19].

Эксперименты 2004 г. привели к выводу: все объекты живой и неживой природы обладают собственными характеристическими полями, характеризующими структуру их спиновой системы. Дистантное (на расстоянии до 75 см) спин-спиновое взаимодействие полей изменяет физические и физико-химические характеристики и свойства веществ и ведет к изменению физических, физико-химических и биологических процессов, в которых эти вещества принимают участие [12].

Детекторы на ДЭС могут быть использованы в различных направлениях при научных исследованиях и в практических целях, например, для мониторинга окружающей среды (в частности, для регистрации предвестников землетрясений [20]), для неконтактного исследования психоэмоционального состояния человека [21, 22], для экспертизы и при обучении экстрасенсов-целителей [23].

#### **Преобразователи на интегральных микросхемах**

Обнаружено, что при определенных условиях операционные усилители (ОУ) на полупроводниковых интегральных микросхемах (ИМС) реагируют изменением выходного потенциала, как при тепловом воздействии, так и на дистантное воздействие человека. Это изменение обусловлено реакцией *p-n* (*n-p*) переходов, входящих в качестве функциональных структурных элементов в состав ИМС. Их индивидуальные вклады в суммарный ответ на воздействие не равновелики. Величина реакции каждого перехода обусловлена его функцией в составе ОУ, режимом работы (заданными вольтамперными параметрами, наличием обратных связей) и удаленностью от входного каскада усиления.

При штатном использовании ОУ напряжение на его выходе  $U_{\text{вых}\Sigma}$  определяется выражением:

$$U_{\text{вых}\Sigma} = U_{\text{вх}2} \cdot K_2 + U_{\text{вх}1} \cdot K_1 + U_{\text{сф}} \cdot K_{\text{усп}}, \quad (11)$$

где  $K_1$  и  $K_2$  – соответственно, коэффициенты усиления инвертирующего и неинвертирующего плеч;  $U_{вх1}$  и  $U_{вх2}$  – значения напряжений исследуемого сигнала на инвертирующем и неинвертирующем входах;  $U_{сф}$  – синфазное напряжение помехи на входах ОУ;  $K_{усф}$  – коэффициент усиления синфазной помехи, поступающей на входы ИМС.

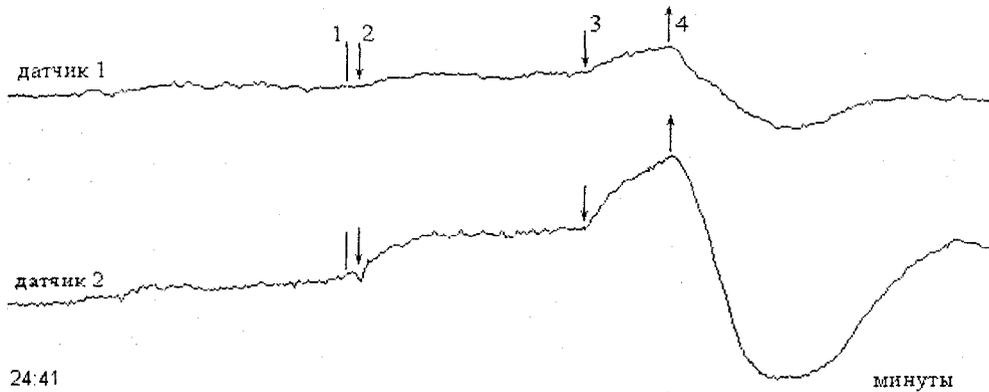
Третий член в выражении (11) – сигнал помехи на выходе ОУ. Между коэффициентом усиления

синфазной помехи  $K_{усф}$  и коэффициентом ее ослабления  $K_{оссф}$  существует зависимость:

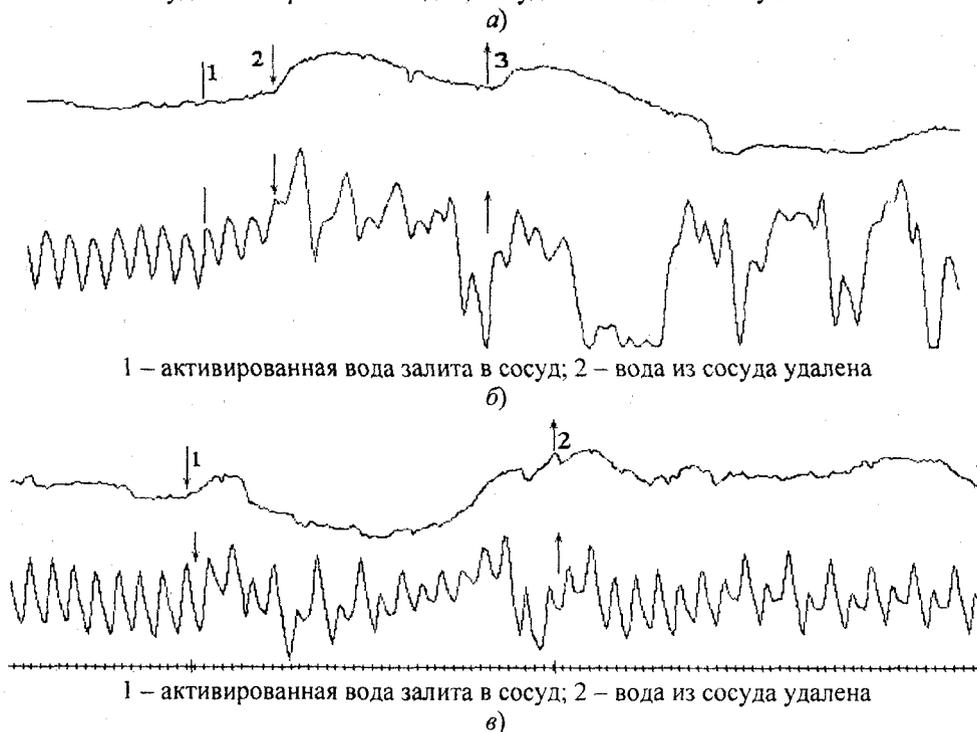
$$K_{усф} = K_y / K_{оссф}, \quad (12)$$

где  $K_y$  – коэффициент усиления ОУ с учетом вводимой обратной связи.

Значение коэффициента подавления синфазной помехи  $K_{оссф}$ , поступающей на вход интегральной микросхемы, приводимое в справочной литературе, обычно составляет 60...80 дБ.



1 – приход экспериментатора в экспериментальное помещение; 2 – установка пустого сосуда; 3 – заполнение сосуда активированной водой; 4 – удаление воды из сосуда. Расстояние  $S = 5$  см.



1 – активированная вода залита в сосуд; 2 – вода из сосуда удалена

1 – активированная вода залита в сосуд; 2 – вода из сосуда удалена

**Рис. 6. Реакции на воздействие собственных и характеристических полей: а – реакция на воздействие собственных полей пустого сосуда и сосуда, содержащего активированную воду; б и в – соответственно, реакции на воздействие характеристических полей активированной и неактивированной воды**

При использовании ОУ в штатном режиме, в случае  $U_{вх1} = U_{вх2} = 0$ ,  $U_{вых\Sigma}$  представляет собой напряжение синфазной помехи, равное:

$$U_{вых\Sigma} = U_{сф} \cdot K_{усф}.$$

В общем случае оно может возникать не только за счет подведения напряжения такой помехи к входу ОУ, но и за счет факторов, воздействующих на полупроводниковую ИМС в целом или на ее отдель-

ные элементы. Таким фактором является, например, тепловой – инфракрасное электромагнитное излучение. Если принять, что все каскады ОУ одинаково восприимчивы к тепловому воздействию, то с учетом равного распределения воздействующего теплового фактора на все  $p-n$  ( $n-p$ ) переходы в объеме ИМС, изменение напряжения  $\Delta U_{вых\Sigma}$  на выходе ОУ должно определяться, в основном, реакцией на это воздействие переходов в первых каскадах усиления. В этом случае  $\Delta U_{вых\Sigma}$  можно условно рассматривать

как результат усиления некоего напряжения  $U_{сф}^T$ , приведенного к входу ОУ.

Реакция ОУ на дистантное воздействие человека, также как и на тепловое воздействие, выражается изменением его выходного потенциала  $U_{вых\Sigma}$  на величину  $\Delta U_{вых\Sigma}$ . Таким образом, ОУ на ИМС при закороченных входах ИМС можно рассматривать как чувствительный элемент – датчик, реагирующий на воздействие инфракрасного излучения и ВНКИЧ. В этом случае величину  $\Delta U_{вых\Sigma}$  следует рассматривать не как напряжение помехи, а как полезный сигнал на выходе датчика.

Из формулы (12) видно, что значение  $K_{усф}$  возрастает с увеличением коэффициента усиления ОУ и при снижении  $K_{оссф}$ . Увеличение коэффициента усиления ОУ лимитируется условием стабильности его работы. Поэтому основной задачей, возникающей при использовании ОУ в качестве датчика, становится снижение заданного паспортного значения  $K_{оссф}$ . Эта задача, обратная подавлению синфазной помехи, достигается установлением неравенства величин  $K_1$  и  $K_2$ , например, путем установления асимметрии (неравенства) величин ЭДС разнополярных источников питания ИМС.

Функция ИМС как сенсорного элемента не изменится, если на один из двух ее входов подать выходное напряжение с аналогичного сенсорного элемента. При этом оконечный сенсорный элемент может одновременно выполнять функцию усилителя постоянного тока (УПТ). С увеличением количества сенсорных элементов величина отношения полезного сигнала к шуму возрастает.

Показано, что с помощью детектора, составленного из двух последовательно включенных ОУ и, по существу, представляющего собой усилитель постоянного тока (УПТ) с закрытым входом, можно проводить биофизические исследования, связанные с дистантным воздействием человека. Нормальная работа такого детектора возможна только при изо-термическом режиме.

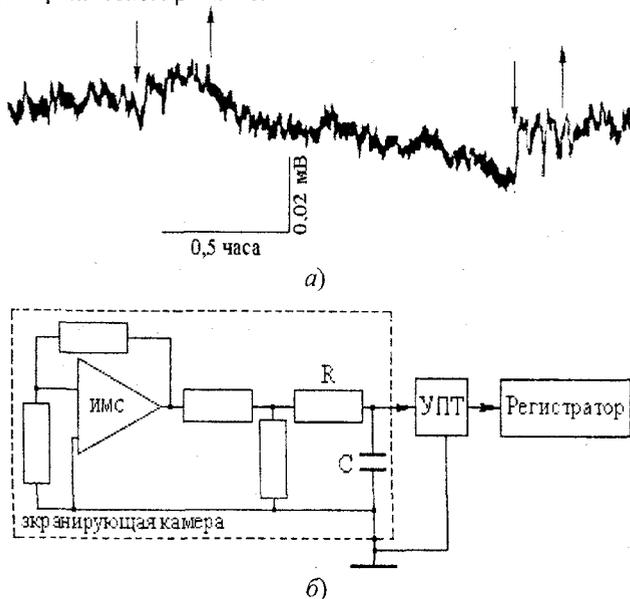


Рис. 7. К исследованию ВВ человека на ИМС типа К553УД1А: а – реакции ИМС на ВВ; б – схема включения ОУ

Эксперименты показали, что при снижении величины ЭДС разнополярных источников питания (в 3 – 4 раза относительно номинала, но при сохранении равенства их значений) не менее 20 % ИМС типа К553УД1А приобретают способность реагировать на дистантное воздействие человека.

На рис. 7, а приведены результаты двух волевых воздействий (ВВ) человека на ИМС типа К553УД1А, а на рис. 7, б – блок-схема установки. На выходе ИМС включена интегрирующая цепочка RC.

Питание ОУ осуществлялось от двух батарей типа 3336 «Планета». ИМС с источниками питания находилась в металлической камере, имеющей размеры 480x480x500 мм, изготовленной из стального листа толщиной 1 мм и экранирующей объект от внешних статических и низкочастотных электрических полей, аэроионов, конвекционных потоков воздуха и светового (за исключением инфракрасного) излучения. Постоянная времени интегрирующей RC-цепи, включенной на выходе ИМС, составляла 3,75 с.

На рис. 7, а величина электромагнитной реакции (ЭР) на ВВ оператора в 2 раза превосходила уровень шумов ИМС: она превышала 12...14 мкВ при напряжении шума порядка 6...7 мкВ. Изменения потенциала совпадают по времени с началом и окончанием первого ВВ и с началом второго ВВ, однако реакция на окончание второго воздействия отсутствует.

На рис. 7, б показана схема датчика на ИМС в составе установки для регистрации реакции на воздействие внешних факторов. На выходе ИМС включена интегрирующая RC-цепочка.

Напряжение с выхода ИМС с помощью экранированного кабеля подавалось на вход УПТ, о котором заранее было известно, что он не отвечает на дистантное воздействие человека. После усиления это напряжение поступало на один из входов двухканального регистратора ТЗ-4221 (ЧССР). Экранирующая камера, электронная схема внутри нее, УПТ и регистратор были заземлены. Калибровка осуществлялась путем подачи калибровочного напряжения на неинвертирующий вход ИМС.

После выхода всей аппаратуры на режим, в отсутствие людей производилась регистрация фоновой уровня выходного потенциала ИМС. Спустя некоторое время оператор входил в помещение и, расположившись на расстоянии 0,5 м от экранирующей камеры, начинал ВВ. Начало ВВ отмечено стрелкой, обращенной к кривой; окончание – от кривой.

На рис. 8 приведены результаты двух экспериментов с двумя последовательно включенными ИМС типа К553УД1А, предварительно отобранными по признаку чувствительности к ВВ человека. ЭДС источников питания составляла  $\pm 4,5$  В. Входы первого ОУ были закорочены. На выходе второй ИМС включена интегрирующая RC-цепь с постоянной времени 3,75 с. Для синхронной регистрации реакции обоих ОУ, сигнал с выхода первой ИМС (кривая 1) подавался на один из входов регистратора ТЗ-4221 через дополнительный УПТ, не отвечавший на дистантное воздействие человека. Сигнал с выхода второй ИМС (кривая 2) подавался на второй вход регистратора без дополнительного усиления.

В первом эксперименте величина шумов на выходе первой ИМС составила 6...8 мкВ, в то время

как величина реакции на волевое воздействие составляет 5-6 мкВ (рис. 8, А-1) и соизмерима с величиной шума. На выходе второй ИМС она составляет порядка 25...30 мкВ и превышает величину шума в 2...3 раза (рис. 8, А-2).

Во втором эксперименте (рис. 8, Б) также четко видна реакция на ВВ: на выходе второй ИМС ее величина составляет порядка 25...30 мкВ и превышает величину шума в 2...3 раза (рис. 8, Б-2).

Реакцию на выходе ИМС, возникающую в ответ на дистантное воздействие человека при равных значениях ЭДС разнополярных источников питания, можно повысить путем подбора их величины.

Детектора на ИМС использовались в различных биофизических экспериментах при исследовании свойств ВНКИЧ. На рис. 9 приведены результаты двух экспериментов, проводившихся в пансионате «Жара» в 1988 г. Синхронные реакции двух детекторов на ИМС возникли в ответ на ВВ двух операторов операторов-сенситивов, находившихся в смежной комнате. Толщина железобетонных стен и перекрытий составляла 15,75 дюйма (около 40 см).

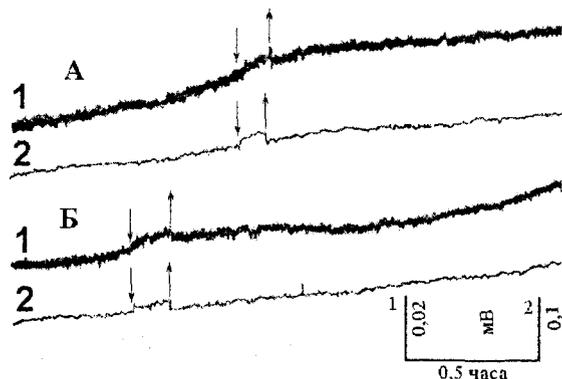


Рис. 8. Реакция на ВВ на выходе детектора на ИМС с двумя последовательно включенными микросхемами

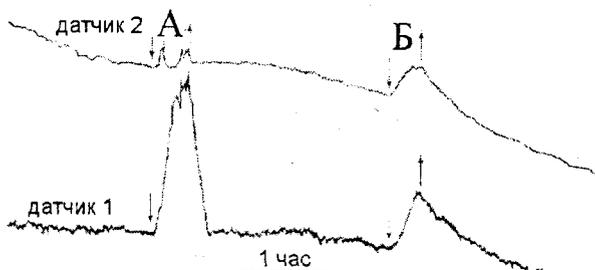


Рис. 9. Реакция двух датчиков на полупроводниковых ИМС на воздействия операторов Л.Д. и Н.Х. из смежного помещения (поз. Б)

#### Литература:

- 1 Бобров А.В. Дистантное воздействие человека на электродную систему / А.В. Бобров, Т.В. Колесникова, Ф.О. Шрайбман // Биофизика. – ВИНТИ, деп. №3950-В85, 1985. – 34 с.
- 2 Бобров А.В. Использование интегральных микросхем в качестве датчика для биофизических исследований // Информационные взаимодействия в биологии. – Матер. Всесоюз. сем. – Тбилиси: Изд. ТГУ, 1987. – С. 56-69.
- 3 Музалевская Н.И. Двойной электрический слой в первичном звене действия слабых сверхнизкочас-

тотных магнитных полей на биологические объекты / Н.И. Музалевская, А.В. Бобров, Ф.О. Шрайбман // Информационные взаимодействия в биологии. – Матер. Всесоюз. сем. – Тбилиси: Изд. ТГУ, 1987. – С. 165-172.

4 Бобров А.В. Моделирование реакции живых систем на внешние воздействия. – Современные проблемы изучения и сохранения биосферы. СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. – С. 227-244.

5 Бобров А.В. Модельное изучение механизма рецепции // Информационные взаимодействия в биологии. – Тбилиси: Изд. ТГУ, 1987. – С. 151-162.

6 Бобров А.В. Сенсорные свойства ДЭС и возможный механизм реакции на воздействие факторов внешней среды. – Сб. тез. докл. на Междунар. конгр. «Биоэнергоинформатика.» (БЭИ-98). – Т. 2. – Барнаул, 1998. – С. 11-16.

7 Шрайбман Ф.О. Электрическая реакция электродной системы на электромагнитное воздействие в дециметровом диапазоне волн / Ф.О. Шрайбман, А.В. Бобров // Информационные взаимодействия в биологии. – Матер. Всесоюз. сем. – Тбилиси: Изд. ТГУ, 1987. – С. 163-164.

8 Бобров А.В. Инструментальное исследование природы и свойств высокопроникающего нетеплового компонента излучения человека. – Препринт N 55. – М.: МНТЦ ВЕНТ, 1995. – С. 15-60.

9 Бобров А.В. Реакция двойных электрических слоев на воздействие торсионного поля. – ВИНТИ. – Деп. № 1055-В97. – М.: 1997. – 26 с.

10 Бобров А.В. Торсионный компонент электромагнитного излучения. – Информационные торсионные поля в медицине и растениеводстве. – ВИНТИ. – Деп. № 635-В98. – М.: 1998. – 41 с.

11 Физический словарь. – М.: Изд. «Советская энциклопедия», 1960.

12 Бобров А.В. Модельное исследование полевой концепции механизма сознания. – Препринт №2. – Орел: ОрелГТУ, 2006. – 175 с.

13 Бобров А.В. Сенсорные свойства двойных электрических слоев в биологии и технике регистрации слабых и сверхслабых излучений. – Препринт 54. – М.: МНТЦ «ВЕНТ», 1994. – 13 с.

14 Бобров А.В. Рецепторная функция двойных электрических слоев // Регуляция тканевого гомеостаза. – Интоксикация, профилактика и терапия хронических патологий. – Тбилиси: Изд-во ГКНТ СССР, 1989 г.

15 Бобров А.В. Рецепторная функция двойных электрических слоев. Полевые информационные взаимодействия. – Орел: ОрелГТУ, 2003. – С. 135-156.

16 Бобров А.В. Модельное исследование механизма неспецифической рецепции. – ВИНТИ. – Деп. № 2223-В2001. – М.: 2001. – 37 с.

17 Богуславский Л.И. Биоэлектрохимические явления и граница раздела фаз. – М.: 1978, С. 219-220.

18 Бобров А.В. Биологические и физические свойства активированной воды. – ВИНТИ. – Деп. №2282-В2002. – М.: 2002. – 24 с.

19 Бобров А.В. Исследование факторов, определяющих биологическую активность воды. – Препринт №1. – Орел: ОрелГТУ, 2004. – 26 с.

20 Бобров А.В. О возможности создания системы прогнозирования землетрясений. Сб. науч. тр. молодых ученых г. Орла. – Орел: ОрелГПИ, 1995. С. 120-122.

21 Бобров А.В. Способ неконтактной регистрации психофизиологического состояния человека. Изобретение № 8, Республика Грузия, 08.02.1993.

22 Бобров А.В. О возможности создания комплекса средств для бесконтактной регистрации психоэмоционального состояния человека // Тез. докл. на I Междунар. науч.-практ. конф. «Языки мозга и тела человека». – Орел: ОрелГТУ, 1995. – С. 2.

23 Бобров А.В. Контроль целительской деятельности операторов-сенситивов с применением датчиков на двойных электрических слоях // Научно-практические исследования в области комплексной медицины. – Всероссийский НИЦ традиционной народной медицины «ЭНИОМ». – М.: 1994, С. 142-145.

УДК. 616.073

Асп. Яковенко М.В.  
(Орловский государственный технический университет)  
Россия, г. Орел, тел. (4862)419876; E-mail: [pms35@mail.ostu.ru](mailto:pms35@mail.ostu.ru)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УДАРНОГО ОБЪЁМА КРОВИ В АСПЕКТЕ ПОСТРОЕНИЯ БИОУПРАВЛЯЕМЫХ ФИЗИОТЕРАПЕВТИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

*The article is devoted to the problem of the hardware check of stroke output at the indirect effect upon its current flow. The aims and tasks of the dynamics study of the stroke volume are defined. Methodics and operations of the experimentations are described and their different outcomes and results of mathematical treatment are also received. The analysis of engineering feasibility of control device is performed.*

### Актуальность проблемы

Среди всех видов физиотерапевтических аппаратов наиболее распространенными являются аппараты для терапии синусоидальными модулированными токами средней частоты, широкое применение которых (до 87 % от всех назначаемых видов физиолечения) ограничивается лишь узким кругом онкологических заболеваний и повышенной чувствительностью пациентов к току [1]. Эффективность использования таких аппаратов зависит, в свою очередь, от индивидуализации используемых параметров, что может быть принципиально решено за счет использования реакции со стороны сердца конкретного пациента на токовые воздействия, т.е. за счет биоуправления [2]. Перспективы разработки биоуправляемой физиотерапевтической токовой аппаратуры зависят от учета динамики изменения ударного объема крови SV – наиболее информативного параметра сердечно-сосудистой системы [3].

### Цель и задачи эксперимента

Целью проведения экспериментов являлось исследование динамических характеристик изменения ударного объема крови, выбрасываемой сердцем человека, при воздействии током лечебного диапазона на участок поверхности тела, расположенный вне зоны изоэлектрических линий сердца.

Для этого необходимо решение следующих научно-исследовательских задач;

1) измерение ударного объема SV во время непрерывного воздействия током с минимальным интервалом дискретизации;

2) измерение ударного объема SV во время отдыха после непрерывного воздействия током с минимальным интервалом дискретизации;

3) построение полученных зависимостей;

4) проведение математической обработки результатов исследования;

5) определение временных характеристик изменения ударного объема SV при воздействии током и отдыхе после воздействия;

6) оценка возможности использования косвенного метода контроля ударного объема через артериальное давление SD, с точки зрения времени измерения.

### Описание экспериментов

Исследование динамики изменения ударного объема SV сопряжено с определенными трудностями, связанными с известными ограничениями использования ЭКГ-аппаратуры при физиолечении, а при использовании ультразвуковых методов – со значительными затратами времени на обработку получаемых эхо-изображений во время экспериментов. Поэтому была разработана методика, предусматривающая использование современных методов цифровой фотографии картинки с экрана эхотомоскопа с последующей обработкой полученного массива данных после проведения экспериментов.

Форма и величина использованного для проведения исследования электрического тока определены допустимыми границами установленных методик проведения физиотерапевтических процедур. Для воспроизведения воздействующего тока при-

менялся аппарат электрофизиотерапии и электро-стимуляции «Амплипульс-7», род работы – 1, частота модуляции 75 Гц, глубина модуляции 50 %, место наложения электродов – медиальная сторона последней трети предплечья и медиальная сторона средней трети плеча правой руки. Для измерения параметров работы сердца был использован эхотомоскоп ЭТС-ДМУ-02-02 с датчиком 3 МГц, режим М с длительностью горизонтальной развертки 3 с.

В сериях экспериментов, обозначенных, как SV5, SV10, SV15, SV20 и SV25, подавали ток на пациента силой 5, 10, 15, 20 и 25 мА, соответственно, в каждой серии. При этом через каждые 10 с с момента начала воздействия производили съемку изображения экрана эхотомоскопа. Следовательно, в течение 3 мин получали восемнадцать кадров на одну серию с изображением 2 – 3-х кардиоциклов на каждом кадре, после чего воздействующий ток отключался. После отключения тока испытуемому, согласно рекомендациям [1], предоставляли время на отдых, в течение которого каждые 10 с также продолжали фотосъемку экрана эхотомоскопа. В результате получили серию выборок из 150 кадров, содержащих информацию об амплитудно-временных характеристиках нарастания и снижения ударного объема в указанном диапазоне воздействующих токов.

Аналогичные опыты были проделаны для четверых испытуемых возраста от 21 до 50 лет, массой тела от 70 до 85 кг, мужского пола, различного уровня физической тренированности и типов физического развития («на силу» и «на выносливость»).

Дополнительно была произведена съемка пяти кадров, размеченных размерными линиями, построенными при помощи встроенных в эхотомоскоп функций кардиоизмерений.

Таким образом, получили массив фотографических изображений, по которому при помощи компьютерной программы CorelDRAW Graphics Suite 12 произвели измерение величины конечного систолического EVs и диастолического объема EVd крови левого желудочка сердца и времени сокращения сердца. Каждый результат измерений соотносили со временем воздействия. Для калибровки и настройки

программы использовались пять размеченных кадров, по которым настраивался и контролировался масштаб изображения в программе. Калибровка программы производилась путем сопоставления размерных линий на снятом заранее размеченном кадре и размерных линий в окне программы.

Далее с использованием программы Mathcad 11 Enterprise Edition определяли по измеренным значениям конечного диастолического EVd и конечного систолического EVs объемов крови ударный объем SV, используя метод Тейхольца, и по времени сокращения сердца оценивали частоту сердечных сокращений HR.

Таким образом, получили табличные зависимости SV от времени воздействия, по которым возможно определить:

- общий вид переходного процесса;
- время нарастания величины ударного объема крови, зависящее от адаптационных возможностей сердечно-сосудистой системы;
- время спада величины ударного объема крови, определяемое релаксационными свойствами сердечной мышцы – миокарда.

В результате проведенных экспериментов удалось впервые определить постоянные времени, характеризующие динамику изменения ударного объема SV при косвенном воздействии током лечебного диапазона на любом заданном уровне от установившегося значения SV.

#### Результаты экспериментов

На рис. 1 представлены графики, показывающие общий вид зависимости ударного объема крови от времени косвенного воздействия на биологический объект синусоидального модулированного тока средней частоты и постоянной амплитуды для двух испытуемых пациентов.

На рис. 2 представлен график, показывающий общий вид зависимости ударного объема крови от времени отдыха после окончания косвенного воздействия на биологический объект синусоидального модулированного тока средней частоты и постоянной амплитуды для двух испытуемых пациентов.

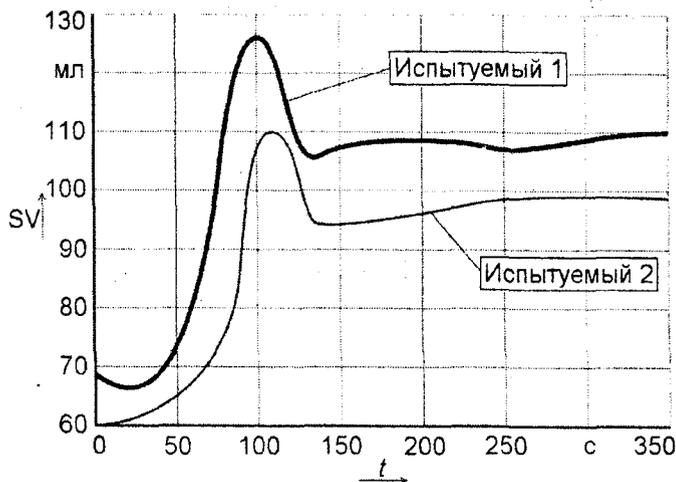


Рис. 1. Общая характеристика зависимость ударного объема крови от времени косвенного воздействия электрическим током

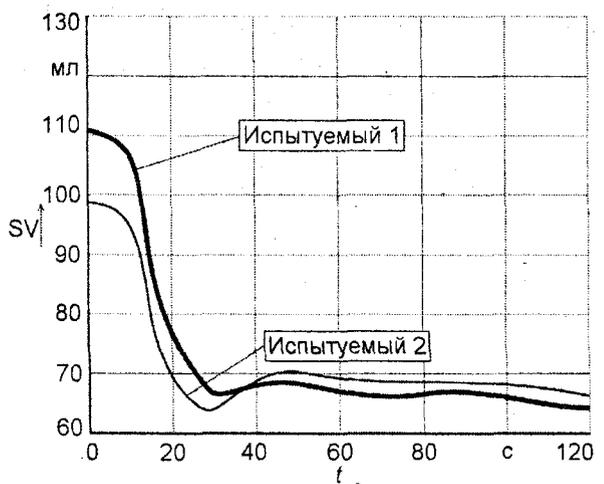
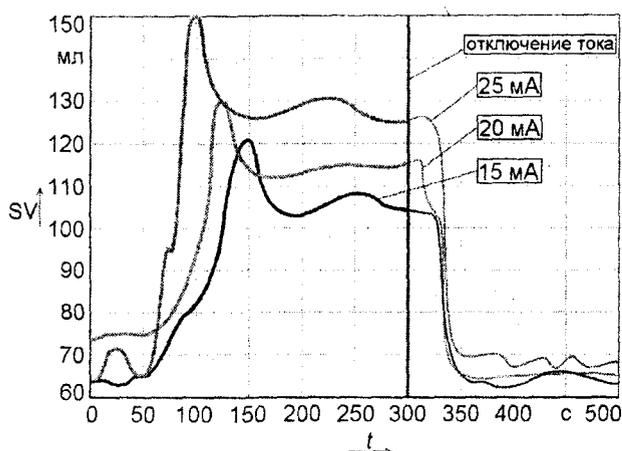


Рис. 2. Общая характеристика зависимость ударного объема крови от времени отдыха после окончания воздействия электрическим током

Графики на рис. 1 и рис. 2 отражают не частную зависимость, а типичную форму переходных процессов сердца для силы тока 15 мА, усредненных по четырем сериям результатов полученных на различных испытуемых пациентах.

На рис. 3 представлено семейство зависимостей ударного объема крови от времени косвенного токового воздействия на испытуемого мужчину 50 лет массой тела 84 кг с выраженным физическим развитием «на выносливость» при подключении тока (жирная линия), а также семейство зависимостей ударного объема крови от времени отдыха, истекшего с момента отключения воздействия на биологический объект тока (тонкая линия).



**Рис. 3. Зависимость ударного объема крови от времени косвенного воздействия током**

Эксперименты показали, что процесс увеличения ударного объема после включения электрического тока находится в некоторой зависимости от силы тока. Очевидно, чем больше сила тока, тем быстрее проявляется максимальное динамическое отклонение (выброс). Максимальная величина постоянной времени  $\tau_{0,97max}$  характеризующей скорость выхода ударного объема на установившийся режим составляет 120 с, а минимальная  $\tau_{0,97min} = 80$  с. Среднее (по зависимости от силы тока) значение постоянной времени составляет  $\bar{\tau}_{0,97} = 100$  с.

Время выхода ударного объема крови на установившийся режим было определено в диапазоне от  $t_{min} = 120$  с до  $t_{max} = 160$  с. Среднее (по зависимости от силы тока) значение времени установления стационарного значения ударного объема  $\bar{t}$  после включения косвенного воздействия на биологический объект синусоидального модулированного тока средней частоты и постоянной амплитуды равно 130 с.

Постоянная времени релаксации находится в диапазоне от максимальной  $\tau_{0,97R max} = 40$  с до минимальной  $\tau_{0,97R min} = 30$  с. Среднее значение постоянной времени  $\bar{\tau}_{0,97R}$  равно 35 с.

После момента отключения воздействующего тока время релаксации значения ударного объема, то есть время выхода сердца на режим, соответствующий состоянию до процедуры, находится в диапазоне от  $t_{min} = 40$  с до  $t_{max} = 60$  с, и составляет в среднем  $\bar{t}_R = 45$  с.

Для оценки возможности использования косвенного метода контроля ударного объема через артериальное давление [2] было произведено вычисление относительного изменения значения ударного объема за время, необходимое для измерения давления. Последнее по осциллометрическим методикам выбрано от 5 до 20 с: нижняя граница соответствует заявленным производителем характеристикам плечевого автоматического тонометра AND 787; верхняя граница — наиболее распространенному автоматическому тонометру OMRON M6.

Для времени измерения 5 с максимальное относительное изменение ударного объема после двух минут воздействия (за это время ударный объем крови SV гарантированно выйдет на установившийся режим) составило 10 мл или 15% при воздействии тока, и 12 мл или 7% при отключении тока (отдыхе испытуемого пациента).

Для времени измерения 20 с максимальное относительное изменение ударного объема составило 15 мл или 20% при воздействии тока, и 12 мл или 7% при отключении тока (отдыхе).

Значение относительной случайной погрешности измерения SV в каждой точке в сериях с доверительной вероятностью 0,97 не превосходило 2%. Отметим, что полученные значения относительного изменения ударного объема удовлетворяют действующим требованиям к точности его измерения.

#### **Выводы**

1 На основании проведенных экспериментальных исследований и их математической обработки впервые выявлен характер и особенности динамики изменения ударного объема крови SV при косвенном воздействии электрическим током лечебного диапазона при использовании эхоаппаратуры.

2 Получены метрологически достоверные значения ударного объема крови, позволяющие использовать их при разработке биоуправляемой физиотерапевтической аппаратуры с учетом динамики изменения SV во время физиопроцедур с токовыми воздействиями.

3 Доказана возможность использования автоматических тонометров со временем измерения 5..20 с в качестве источника обратной связи в физиотерапевтической аппаратуре токового воздействия.

#### **Литература:**

1 *Техника и методика проведения физиотерапевтических процедур: Справочник / Под ред. В.М. Боголюбова и Т.Н. Пономаренко. — Тверь: Губернская типография, 2002. — 250 с.*

2 *Егоров Б.А. К вопросу о разработке биоуправляемой медицинской аппаратуры // Известия ОрелГТУ. — Сер. Машиностроение. Приборостроение. — 1999. — № 4. — С. 35-42.*

3 *Егоров Б.А. Предпосылки разработки биоуправляемой электрофизиотерапевтической аппаратуры / Б.А. Егоров, М.В. Яковенко, М.А. Евзельман; под ред. проф. С.П. Маркина // Проблемы восстановительного лечения. — Сб. науч. тр. — Т. 5. — Воронеж: Воронежская гос. мед. акад. — 2005. — С. 70-82.*

УДК 53.082.62:536.5:621.891

Асп. Кузнецова Е.В.  
(Орловский государственный технический университет)  
Россия, г. Орел, (4862)419876; E-mail: pms35@mail.ostu.ru

## МАКСИМАЛЬНЫЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЗОНЕ ТРЕНИЯ И ПРИЧИНЫ, ЗАТРУДНЯЮЩИЕ ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЕ

*In was executed analysis of methods for measurement surface friction temperature, and observed theirs disadvantages. Cited cases what complicates measurement of described temperature by method of natural thermocouple, which let measure maximal values of temperatures in friction area of real friction unit.*

В процессе проектирования узлов трения, а также для прогнозирования процессов трения и изнашивания необходимо знать максимальные температуры, генерируемые в поверхностных слоях материалов трибосопряжения. Это объясняется тем, что в средне- и тяжело нагруженных узлах трения и при высокоскоростном трении скольжения фрикционный нагрев особенно интенсивен и локализуется в тонких слоях сопрягаемых материалов. Именно максимальная температура в поверхностном слое материала вносит значительный вклад в формирование процессов, приводящих к износу трущихся тел.

Температурное поле в поверхностном слое трибосопряжения исследуется, как правило, расчетными методами. Это связано со сложностью постановки и проведения экспериментов по регистрации максимальной температуры (малые размеры и время существования локальных тепловых источников), приводящей к большим погрешностям её измерения.

Теоретически, учитывая гипотезу суммирования температур, мгновенная максимальная температура  $\Theta_{max}(t)$  на поверхности трения есть сумма начальной температуры пары трения  $\Theta_0$  и приращений объемной температуры трибосопряжения, её поверхностной температуры и температуры вспышки по отношению к  $\Theta_0$ , то есть:

$$\Theta_{max}(t) = \Theta_0 + \Theta_{об}(t) + \Theta_{п}(t) + \Theta_{всп}(t). \quad (1)$$

где  $\Theta_{об}(t)$  – приращение объемной температуры трибосопряжения по отношению к начальной температуре пары трения;

$\Theta_{п}(t)$  – приращение поверхностной температуры трибосопряжения по отношению к начальной температуре пары трения;

$\Theta_{всп}(t)$  – приращение температуры за счет вспышки по отношению к начальной температуре пары трения.

Рядом ученых предложены различные теоретические зависимости определения мгновенных значений максимальных температур, величина и продолжительность которых играет решающую роль в возникновении многих видов разрушений. Эти зависимости связывают температуру с физико-механическими и геометрическими параметрами трибосопряжения.

К сожалению, расчетные значения максимальных температур, полученные в соответствие с дан-

ными, приведенными в некоторых работах [1, 2], могут значительно отличаться от экспериментальных в меньшую сторону. При этом расхождение в результатах иногда достигает 100 % [1].

В настоящее время существует ряд экспериментальных методов определения температур в зоне трения, которые позволяют с той или иной степенью точности оценивать максимальные температуры в зоне трения. Судить о превышении температуры над каким-либо уровнем можно по результатам косвенных измерений, реализуемых методами цветных индикаторов, цветов побежалости, легкоплавких вставок, оценки структурных изменений, микротвердости, магнитных свойств. Основной недостаток всех перечисленных способов оценки максимальной температуры в зоне трения заключается в большем разрыве времени между экспериментом и получением результатов. Кроме того, в большинстве случаев они требуют внесения конструктивных изменений в исследуемые механизмы, следствием чего является изменение условий и режимов трения, а также невозможность их дальнейшей эксплуатации.

Методами непосредственной оценки температуры, пригодными для прямого измерения её максимального значения в реальном времени являются методы естественной, полуискусственной и комбинированной термопар, метод электрического сопротивления, пирометрические и термографические методы (метод кино- и фотосъемки, метод оптико-электронного сканирования).

Методы полуискусственной и комбинированной термопар имеют общий недостаток, заключающийся в том, что регистрация температуры производится не между трущимися телами, а между одним из них и электродом.

Недостатком пирометрических и термографических методов является то, что одно из тел в паре трения должно быть, в зависимости от применяемого метода, либо прозрачным для теплового излучения, либо оптически активным или имеющим сквозное отверстие для прохождения теплового излучения, что не позволяет применять их для оценки температур в реальных трибосопряжениях, например, в подшипниках скольжения и качения.

Единственным методом, позволяющим регистрировать температуру непосредственно в реальном трибосопряжении, является метод естественной

термопары. Термоэлектродами естественной термопары служат фрикционно сопряженные тела, а температуру в зоне трения определяют по значению регистрируемой разности потенциалов. Но и этот метод, являющийся практически безинерционным, в свою очередь также обладает недостатками, среди которых нужно выделить следующие: сложность проведения градуировки; возможность получения информации только о некоторой усредненной температуре, причем усреднение осуществляется по фактической площади контакта и времени измерения; изменение термоэлектрических параметров трибосопряжения из-за наличия пленок в зоне трения; наличие паразитных ЭДС, возникающих в трибосопряжении (трибо-, акустоЭДС, электрохимическую ЭДС, ЭДС электромагнитной индукции, экзотермическую ЭДС и другие); шумы токосъемного устройства. В работе [3] обосновано, что паразитные термоЭДС, ввиду их малости, можно не учитывать, а шумы токосъемных устройств можно уменьшить с помощью схемы компенсации термоЭДС скользящего контакта, приведенной в работе [4]. Следствием перечисленных недостатков метода является недостаточная точность измерений.

Чтобы уменьшить влияние усреднения температуры по поверхности необходимо уменьшать количество точек, вступающих в контакт, по которым проводится это усреднение. Это можно было бы осуществить за счет повышения жесткости материалов трибопары, уменьшения усилия прижатия в зоне трения, уменьшения площади контакта. Перечисленные приемы невозможно выполнить в исследуемом реальном трибосопряжении.

В работе [5] показано, что наличие электропроводящей пленки между элементами трибосопряжения, имеющей различные контактные температуры с каждым из них, искажает значение термоЭДС, генерируемой в цепи естественной термопары, в сторону как уменьшения, так и увеличения её значений.

Все эти факторы влияют на правильную оценку максимальных температур в зоне трения методом естественной термопары. Именно этим могут быть

объяснены расхождения в значениях температур, найденных по осциллограммам термоЭДС, пиковые значения которых соответствуют температурам порядка 300...400°C, и значениям температур для тех же пар трения, полученных методом цветов побежалости и структурных изменений, составляющих 1100...1200 °C.

Вследствие этого необходимо разработать алгоритмы определения максимальных температур в зоне трения методом естественной термопары, используя априорные данные о свойствах поверхностных слоев трущихся тел. Одной из основных величин, обуславливающих значение генерируемой поверхностными слоями термоЭДС, определяющей значения  $\Theta_n(t)$  и  $\Theta_{всп}(t)$  является термоэлектрическая способность поверхности, которая зависит от физико-механических и химических свойств поверхностных слоев материалов. Поэтому при измерении максимальных температур в зоне трения необходимо иметь априорную информацию о поверхностной термоэлектрической способности материалов трибопары.

#### Литература:

- 1 Богданович П.Н. Трение и износ в машинах: Учебник для вузов. / П.Н. Богданович, В.Я. Прушак. – Минск: Высшая школа, 1999. – 374 с.
- 2 Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе [и др.]; Под ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 575 с.
- 3 Козлов А.В. Электрические явления в зоне сухого трения // Тез. докл. науч.-техн. конф. вузов Центральной России. – Брянск, 2000. – С. 76.
- 4 Плахова Е.В. Способ уменьшения влияния термоЭДС скользящего контакта на результаты измерения // Контроль и автоматизация: Межвуз. сб. науч. ст. – Орел: ОрелГПИ, 1993. – С. 32-39.
- 5 Ногачева Т.И. Естественная термопара с промежуточным электродом // Сб. науч. тр. «Вопросы технологии, безопасности и качества в приборостроении». – Орел: ЗАО «ОрлЭКС», 1999 г. – С. 66-71.

УДК 621.822.6-97: 621:317.757.08

Д-р техн. наук, проф. Корндорф С.Ф., асп. Чекашова Н.В.  
(Орловский государственный технический университет)  
Россия, г. Орел, тел. (4862)419876; E-mail: pms35@mail.ostu.ru

## РАЗДЕЛЕНИЕ КАНАЛОВ ПО ЧАСТОТЕ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ СМАЗОЧНОЙ ПЛЁНКИ В ЗОНЕ ТРЕНИЯ ТЕРМОШУМОВЫМ МЕТОДОМ

*Article considers thermal inspection method of lubricating stuff's temperature in friction zone of rolling bearings. Method includes frequency division of measuring channels. Results of investigation and mathematical calculations presented.*

С целью уменьшения износа в подшипниках качения и других фрикционных системах используют смазочные материалы. В процессе работы трибо-

сопряжений происходит нагрев зоны трения и смазочного вещества. Это приводит к снижению вязкости последнего и уменьшению толщины смазоч-

ной плёнки. При дальнейшем разогреве зоны трения трибосопряжения происходит полное разрушение смазочной плёнки и переход от жидкостного к граничному или сухому режимам трения, что в свою очередь влечёт за собой износ пар трения, с последующим выходом из строя всего механизма. Поэтому важно своевременно осуществлять контроль температуры в зоне трения, так как это позволит предотвратить многие сбои в работе устройств и возможные аварийные ситуации.

Для неразрушающего контроля температуры смазочной плёнки наиболее эффективным является термошумовой метод, основанный на измерении электротепловых шумов генерируемых смазочным материалом в зоне трения. Смазочная плёнка в этом случае рассматривается как проводник с большим сопротивлением, а её активное сопротивление как источник тепловых электрических шумов. Суть метода состоит в измерении среднеквадратического значения напряжения этих шумов, которые зависят от температуры смазочного вещества. Значение этого напряжения определяется формулой Найквиста:

$$\overline{E_{ш}^2} = 4 \cdot k \cdot \Delta f \cdot \Theta \cdot R_i, \quad (1)$$

где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  – постоянная Больцмана;

$\Theta$  – абсолютная температура;

$R_i$  – активная составляющая сопротивления;

$\Delta f$  – полоса частот измерения.

В приведённое уравнение входят две неизвестные величины: интересующая нас температура  $\Theta$  и активная составляющая сопротивления  $R_i$ . Эти величины при работе подшипника изменяются по случайному закону и в каждый момент времени принимают различные значения. В связи с этим возможность применения термошумового метода должна быть рассмотрена с учётом непостоянства сопротивления и температуры смазочной плёнки.

В работе [1] рассмотрены два способа реализации термошумового метода.

*Первый способ* предполагает поочерёдное измерение во времени среднеквадратического значения напряжения шумов и сопротивления смазочной плёнки. При этом реализация данного способа возможна лишь при условии стационарности процесса трения в течение используемого промежутка времени, когда значения оценок математического ожидания, среднеквадратического отклонения, дисперсии результатов измерения за определённый интервал времени близки к значениям моментов исследуемого процесса за указанный промежуток времени. Однако данное требование не выполняется, если оценка моментов происходит за малый промежуток времени, а при увеличении промежутка времени обычно процесс уже нельзя считать стационарным.

*Второй способ* реализации термошумового метода предполагает одновременное измерение напряжения шумов и сопротивления смазочной плёнки, но в различных частотных каналах. При этом необходимо выяснить, как изменяется сопротивление смазочного материала в зависимости от частоты, что позволит установить зависимость между значениями

сопротивления, измеренными на двух смежных частотах или доказать то, что в достаточно узкой полосе частот сопротивление смазочного материала остаётся практически неизменным. Для этого были проведены исследования сопротивления смазочного материала на различных частотах.

Смазочный материал был залит в измерительную ячейку, представляющую собой цилиндрический конденсатор. Затем в электрическую цепь были последовательно включены ячейка и заранее измеренное сопротивление нагрузки  $R_{нагр}$ , на котором измерялось напряжение шумов на заданной частоте настройки  $f$  при полосе пропускания  $\Delta f = 10$  кГц.

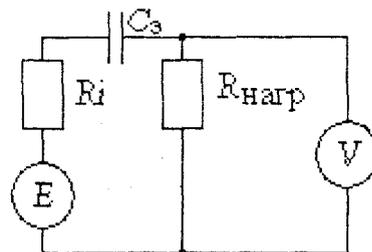


Рис. 1. Эквивалентная измерительная схема

Исследуемую измерительную ячейку целесообразно представить в виде последовательного соединения источника ЭДС электрических шумов, активного сопротивления  $R_i$  и электрической ёмкости  $C_3$ . Эквивалентная измерительная схема, соответствующая процессу измерения электрического напряжения шумов, приведена на рис. 1.

Напряжение на сопротивлении нагрузки определялось с помощью селективного вольтметра В6-1, измеряющего среднеквадратическое значение напряжения. Так как сопротивление нагрузки много меньше входного сопротивления прибора, то им можно пренебречь. В этом случае ток, протекающий в цепи при  $\Delta f/f \ll 1$ , рассчитывали по уравнению:

$$I = \frac{E}{\sqrt{(R_i - R_{нагр})^2 + \left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}\right)^2}}, \quad (2)$$

где  $R_i$  – активная составляющая сопротивления смазочного материала;

$R_{нагр}$  – сопротивление нагрузки;

$C_3$  – ёмкость измерительной ячейки со смазочным материалом, соединительных проводов и пересчитанная в ячейку входная ёмкость измерительного прибора;

$f$  – частота электрического тока, на которой проводятся измерения,

$E$  – ЭДС в контуре.

Измеренное значение напряжения шумов определяется выражением:

$$U_1 = I \cdot R_{нагр}. \quad (3)$$

В приведённом уравнении нам неизвестны три величины:  $E$ ,  $R_i$  и  $C_3$ . Для их определения необходимо иметь систему из 3-х уравнений. С этой целью измерения проводились при трёх значениях сопротивления нагрузки  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ . Так как сопро-

тивление нагрузки много меньше входного сопротивления прибора, то им можно пренебречь.

Указанная система уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} U_1 = \frac{E \cdot R_{1нагр}}{\sqrt{(R_i - R_{1нагр})^2 + (X_c)^2}} \\ U_2 = \frac{E \cdot R_{2нагр}}{\sqrt{(R_i - R_{2нагр})^2 + (X_c)^2}} \\ U_3 = \frac{E \cdot R_{3нагр}}{\sqrt{(R_i - R_{3нагр})^2 + (X_c)^2}} \end{cases} \quad (4)$$

где  $X_c$  – реактивное сопротивление ячейки, определяемое из выражения:

$$X_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_3}$$

После преобразования системы уравнений (4) получаем следующие равенства:

$$\begin{aligned} \left(\frac{U_1}{U_3}\right)^2 &= \left(\frac{R_{1нагр}}{R_{3нагр}}\right)^2 \cdot \frac{(R_i + R_{3нагр}) + (X_c)^2}{(R_i + R_{1нагр}) + (X_c)^2} \\ \left(\frac{U_2}{U_3}\right)^2 &= \left(\frac{R_{2нагр}}{R_{3нагр}}\right)^2 \cdot \frac{(R_i + R_{3нагр}) + (X_c)^2}{(R_i + R_{2нагр}) + (X_c)^2} \end{aligned} \quad (5)$$

Введём обозначения:

$$K_1 = \left(\frac{U_{1нагр}}{U_{3нагр}} \cdot \frac{R_{3нагр}}{R_{1нагр}}\right)^2, \quad K_2 = \left(\frac{U_{2нагр}}{U_{3нагр}} \cdot \frac{R_{3нагр}}{R_{2нагр}}\right)^2 \quad (6)$$

Тогда получим:

$$\begin{cases} K_1 \left[ (R_i + R_{1нагр})^2 + X_c^2 \right] = (R_i + R_{3нагр})^2 + X_c^2 \\ K_2 \left[ (R_i + R_{2нагр})^2 + X_c^2 \right] = (R_i + R_{3нагр})^2 + X_c^2 \end{cases} \quad (7)$$

Откуда получаем следующую зависимость для активной составляющей сопротивления смазочного материала  $R_i$ :

$$R_i = \frac{-K_1 \cdot K' \cdot R_{1нагр}^2 + K_2 \cdot K'' \cdot R_{2нагр}^2 + K''' \cdot R_{3нагр}^2}{2 \left[ K_1 \cdot K' \cdot R_{1нагр} - K_2 \cdot K'' \cdot R_{2нагр} - K''' \cdot R_{3нагр} \right]} \quad (8)$$

где  $K' = K_2 - 1$ ,  $K'' = K_1 - 1$ ,  $K''' = K_2 - K_1$ .

Аналогичным образом можно определить значения неизвестной ЭДС контура и ёмкости измерительной ячейки. Электрическая ёмкость измерительной ячейки  $C_3$  определяется по формуле:

$$C_3 = \frac{1}{2\pi f \cdot \sqrt{\frac{K_1 (R_i + R_{1нагр})^2 - K_2 (R_i + R_{2нагр})^2}{K_2 - K_1}}} \quad (9)$$

Выражение для вычисления значений ЭДС в контуре имеет следующий вид:

$$E = \frac{U \cdot \sqrt{(R_i - R_{нагр})^2 + \left(\frac{1}{2\pi f C_3}\right)^2}}{R_{нагр}} \quad (10)$$

Экспериментальные исследования позволили определить значения напряжения на различных сопротивлениях нагрузки  $R_1 = 13$  кОм,  $R_2 = 27$  кОм,  $R_3 = 56$  кОм. Изготовленная измерительная ячейка, представляющая собой цилиндрический конденсатор высотой 60 мм, с внешним диаметром 55 мм и внутренним 45 мм была заполнена смазочным материалом Литол-24. Значения напряжений, полученные в результате измерений, даны в таблице 1.

Таблица 1 – Экспериментальные данные

Частота, МГц	Среднеквадратическое значение напряжения шума при $R_{нагр}$ , кОм		
	13	27	56
11	3,2	5,8	9
11,5	3	6	10
12	3,5	6	9,2

Активная составляющая  $R_i$  сопротивления смазочного материала плавно уменьшается с увеличением частоты. Заменяя полученную кривую прямой линией, определяем её крутизну  $S$ .

$$S = \frac{R_k - R_n}{f_k - f_n} = -28 \frac{\text{Ом}}{\text{МГц}} \quad (11)$$

Изменения сопротивления в пределах полосы пропускания составляет:

$$\Delta R = S \cdot \Delta f = 0,28 \text{ Ом}, \quad (12)$$

что по отношению к сопротивлению потерь ячейки ( $R = 20$  Ом) при частоте  $f = 11,5$  МГц составляет  $\Delta R/R = 0,28/20 = 0,014$ , то есть 1,4 %.

По экспериментальным данным были рассчитаны значения активной составляющей сопротивления смазки и построена зависимость этого сопротивления от частоты, представленная на рис. 2.

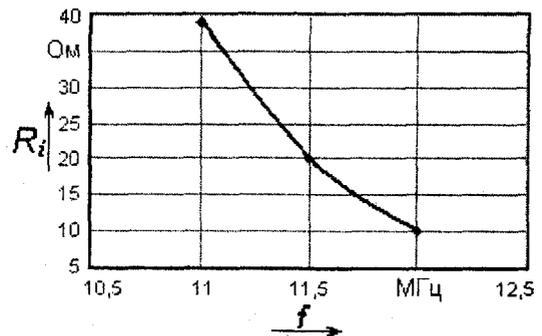


Рис. 2. Зависимость активной составляющей сопротивления смазочного материала от частоты

Такое малое изменение сопротивления позволяет в пределах полосы пропускания считать его постоянным. Если использовать для описанного выше способа измерения температуры две полосы частот, средние частоты которых расположены на расстоянии  $2\Delta f$  друг от друга, то изменение сопротивления составляет 0,028 или 2,8 %. Это изменение сопротивления необходимо учитывать при расчёте температуры по напряжению шумов.

В результате исследований частотного диапазона от 11 до 12 МГц установлено, что значение сопротивления смазочного материала в полосе частот не более  $2\Delta f$  остаётся практически неизменным. Это обстоятельство позволяет разделить измерительные каналы, выбрав две частоты в пределах более  $\Delta f$ , но менее  $2\Delta f$ , на которых возможно будет измерить среднеквадратическое значение напряжения шума и активную составляющую сопротивления смазочного

материала, по которым, согласно выражению (1), можно определить температуру в зоне трения.

#### Литература:

1 Корндорф С.Ф. Термошумовой метод определения температуры смазывающей пленки / С.Ф. Корндорф, Н.В. Чекашова // Известия ОрелГТУ. – Сер. Машиностроение. Приборостроение. – Орел: ОрелГТУ, 2005. – №1. – С. 46-48.

УДК 620.179.1.082.7:658.58

*Д-р техн. наук, проф.* Подмастерьев К.В., *канд. техн. наук* Марков В.В.  
(Орловский государственный технический университет)  
Россия, г. Орел, тел. (4862)419876; E-mail: [pms35@mail.ostu.ru](mailto:pms35@mail.ostu.ru)

## СПОСОБ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА КОЛЕЦ ПОДШИПНИКА КАЧЕНИЯ В УЗЛЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

*In this article is grounded the necessity of diagnostic the bearings of rolling in the knots of technical systems. The new method of diagnostic the rings of the bearings of rolling by the relative electro resistive diagnostically parameter is offer. The description of the mean of diagnostic, which is realization the offered method, is give. The results the control primer of realization the offered method of control the quality the rings of the bearings of rolling in the knots of technical systems is give an account.*

#### Актуальность проблемы и цель работы

Качество технических систем (ТС), например, механизмов, машин, приборов, определяется степенью их соответствия потребностям потребителей. Не умаляя значимости всех свойств ТС, рациональное сочетание которых формирует качество данных объектов, отметим, что одним из основных свойств любой промышленной продукции, влияющих на ее качество, является надежность. Надежность ТС в целом определяется надежностью ее элементов.

Известно, что в настоящее время в конструкцию многих ТС входят подшипники качения (ПК). Работая в условиях повышенной жесткости (большие динамические нагрузки, высокие скорости вращения, повышенные температуры контактирующих поверхностей, частые нарушения условий смазывания), ПК, установленные в узлах ТС, часто обладают значениями показателей надежности, на порядок меньшими, чем другие элементы ТС, работающие в более мягких условиях. Надежность системы в целом определяется показателями наименее надежного элемента, следовательно, надежность ТС будет определяться надежностью входящих в ее состав ПК.

ПК – это стандартные изделия, для которых строго регламентированы методики приемосдаточных испытаний. Предприятия, изготавливающие подшипники, стабильно работают в течение десятилетий, непрерывно повышая качество и стабильность характеристик своей продукции. Поэтому можно с достаточной степенью достоверности утверждать, что новые ПК, прошедшие на предприятии-изготовителе технологическую обкатку, обладают заявленными в технических условиях показателями надежности.

Однако, подшипники, как правило, функционируют в составе ТС – механизма, машины или прибора. Номенклатура ТС очень обширна, постоянно разрабатываются новые типы машин, поэтому предусмотреть и стандартизировать все особенности их проектирования, изготовления, регулировки и испытаний не представляется возможным. Не исключены также ошибки, заложенные в нестандартное изделие при его проектировании или изготовлении. Все эти факторы приводят к тому, что всегда существует вероятность установки качественного подшипника в дефектный подшипниковый узел. При монтаже подшипника в узел возможны дефекты сборки (перекосы, деформации, повреждения деталей подшипника). В результате качество нового подшипника, установленного в дефектный подшипниковый узел с нарушениями технологии сборки, может значительно снизиться, вплоть до недопустимо низкого значения (то есть, можно разрушить качественный подшипник всего лишь при его установке в узел). В этой связи разработка новых методов диагностирования ПК, установленных в узлах ТС, представляется актуальной задачей.

#### Описание предложенного способа контроля

Задача диагностирования ПК в узлах существует уже давно, известны подходы к ее решению. В частности, описанию этой проблемы посвящена глава обзорной работы [1]. Известны способы контроля качества ПК, заключающиеся в том, что нагружают смазанный подшипник, вращают одно из его колец и измеряют параметры флуктуирующей проводимости подшипника, по значениям которых оценивают его качество, в частности, качество дорожек каче-

ния колец. В известном способе [2] измеряют значения мощностей флуктуаций электрического тока, протекающего через подшипник при подключении его колец к источнику электрического напряжения, в двух одинаковых по ширине диапазонах частот с различными начальными частотами, а о качестве подшипника судят по разности измеренных значений мощностей. В известном способе [3] для контроля качества измеряют среднее значение нормированного интегрального времени (НИВ) электрического контактирования в подшипнике. Недостатком указанных способов контроля ПК является то, что они обеспечивают получение лишь усредненной комплексной оценки качества подшипника в целом, но не дают возможности выделения информации о состоянии его отдельных деталей.

Большой практический интерес представляет способ диагностирования колец ПК, заключающийся в том, что вращают одно из колец смазанного подшипника с рабочей частотой, создают радиальное циркуляционное нагружение контролируемого кольца с рабочей частотой и местное нагружение неконтролируемого кольца, измеряют частоту вращения сепаратора и среднеквадратические значения гармонических составляющих диагностического параметра на информационных частотах  $F_n$ , определяемых по формуле [4]:

$$F_n = F_c \cdot Z + F_k \cdot M \cdot L, \quad (1)$$

где  $F_k$  – частота вращения кольца;  
 $F_c$  – частота вращения сепаратора;  
 $Z$  – число тел качения в подшипнике;  
 $M$  – числовой коэффициент, значение которого выбирают равным 2 при оценке овальности и равным 3, 4, ... при оценке огранки соответствующего порядка;  
 $L$  – числовой коэффициент.

В данном способе диагностирования колец ПК в качестве диагностического параметра используют нормированное интегральное время (НИВ) электрического контактирования в подшипнике  $K$ . Среднеквадратические значения гармонических составляющих  $K_r$  параметра НИВ измеряют при значениях коэффициента  $L$ , равных 1 или 2 в зависимости от требуемого диапазона оцениваемого отклонения от круглости. Измеряют также среднеквадратическое значение переменной составляющей диагностического параметра  $K_0$ , а об отклонениях от круглости дорожки качения контролируемого кольца судят по значению диагностического параметра  $k_m$ :

$$k_m = \frac{K_r^2}{K_0^2}, \quad (2)$$

где  $K_r$  – среднеквадратическое значение гармонической составляющей диагностического параметра НИВ, измеренное на информационной частоте  $F_n$ , определяемой по формуле (1) для конкретного вида отклонений формы колец подшипника (овальность, огранка);  
 $K_0$  – среднеквадратическое значение переменной составляющей параметра НИВ.

Не умаляя достоинств данного способа, отметим, что существуют причины, препятствующие его широкому применению в соответствии с назна-

чением. Нормированное интегральное время электрического контактирования (параметр НИВ) является эффективным диагностическим параметром только при работе подшипника в условиях смешанной (полужидкостной) смазки. Независимо от состояния подшипника при его работе в условиях жидкостной смазки (характерно для высококачественных высокоскоростных опор) значение НИВ становится равным нулю, а в условиях граничной смазки (характерно для низкооборотных опор) НИВ становится равным единице. В обоих случаях метод контроля неработоспособен. Таким образом, область использования этого способа контроля и его достоверность при проведении механосборочных работ ограничены.

Научной школой кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация» Орловского государственного технического университета (ОрелГТУ) предложен новый способ контроля качества колец подшипника качения, установленного в узле технической системы (механизма, машины, прибора и т.п.). Предложенный способ решает задачу расширения области применения и повышения достоверности контроля качества колец установленного в узле подшипника при проведении механосборочных работ. Технический результат – оценка реальных, сформировавшихся при сборке подшипникового узла отклонений формы колец подшипника качения, работающего при любом режиме смазки (жидкостном, смешанном или граничном).

Сущность предложенного способа контроля качества колец ПК, установленного в узле ТС, заключается в следующем. В процессе контроля вращают одно из колец смазанного подшипника с рабочей частотой, создают радиальное циркуляционное нагружение контролируемого кольца с рабочей частотой и местное нагружение неконтролируемого кольца, измеряют частоту вращения сепаратора и среднеквадратические значения гармонических составляющих диагностического параметра на информационных частотах  $F_n$ , определяемых по формуле (1).

Заявленный технический результат достигается тем, что в качестве диагностического признака используют электрическое сопротивление подшипника  $R$ . Среднеквадратические значения гармонических составляющих диагностического параметра  $R_n$  измеряют на информационных частотах  $F_n$  при значении числового коэффициента  $L = 3$ . Дополнительно измеряют среднеквадратическое значение несущей гармонической составляющей диагностического параметра  $R_n$  на несущей частоте  $F_n = F_c \cdot Z$ . Об отклонениях формы дорожки качения контролируемого кольца подшипника судят по значению диагностического параметра  $k_n$ , определяемого по следующей формуле:

$$k_n = \frac{R_n^2}{R_n^2}, \quad (3)$$

где  $R_n$  – среднеквадратическое значение электрического сопротивления контролируемого подшипника на информационной частоте  $F_n$ ;  
 $R_n$  – среднеквадратическое значение электрического сопротивления контролируемого подшипника на несущей частоте  $F_n$ .

Сущность предложенного способа поясняется рисунками. На рис. 1 представлена схема устройства для осуществления способа контроля качества колец ПК, установленного в узле ТС. На рис. 2 показан пример конструктивного исполнения устройства нагружения подшипникового узла.

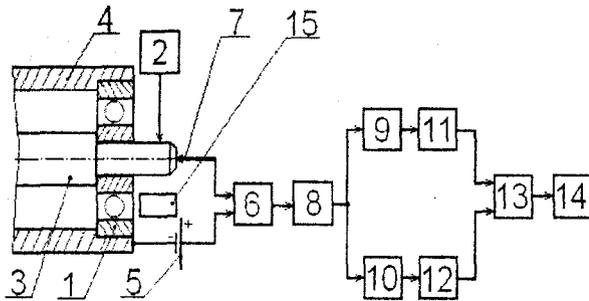


Рис. 1. Структурная схема устройства для осуществления способа контроля качества колец подшипника качения

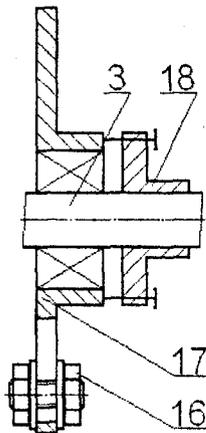


Рис. 2. Пример конструктивного исполнения устройства нагружения подшипникового узла

Устройство, реализующее предложенный способ контроля качества колец ПК, работает следующим образом. Внутреннее кольцо контролируемого подшипника 1, нагруженного радиальной силой с помощью устройства нагружения 2, установлено на валу 3 сборочного узла, наружное кольцо – в корпусе 4. Устройство содержит источник 5 электрического напряжения, один полюс которого через преобразователь 6 сопротивления в напряжение и токоємник 7, вал 3 подключен к внутреннему кольцу подшипника 1, а другой полюс подключен к наружному кольцу подшипника 1. К выходу преобразователя 6 сопротивления в напряжение подключен усилитель 8, выход которого через узкополосные фильтры 9 и 10 связан с входами квадратичных детекторов 11 и 12. Выходы детекторов 11 и 12 подключены к входам преобразователя 13 отношений, выходной сигнал которого поступает на вход устройства 14 индикации. Первичный преобразователь измерителя частоты вращения 15 расположен в непосредственной близости от сепаратора подшипника 1. Устройство нагружения 2 (рис. 2) может быть выполнено, например, в виде устройства дисбаланса, представляющего собой груз 16, закрепленный на диске 17, который, в свою очередь, установлен с помощью муфты 18 на валу 3.

Способ контроля качества колец подшипника осуществляют следующим образом. С помощью вала 3 вращают внутреннее кольцо испытуемого подшипника 1 с рабочей частотой  $F_k$ , а устройством нагружения 2 создают радиальное циркуляционное нагружение контролируемого кольца с рабочей частотой и местное нагружение неконтролируемого кольца. При контроле вращающегося внутреннего кольца муфту 18 отключают и устройством дисбаланса, не находящимся в зацеплении с валом 3, создают постоянную по величине и направлению радиальную силу. В этом случае контролируемое внутреннее кольцо испытывает циркуляционное нагружение с частотой  $F_k$ , а неконтролируемое наружное – местное. При контроле неподвижного наружного кольца включением муфты 18 обеспечивают зацепление диска 17 устройства дисбаланса с валом 3. Диск 17, вращаясь вместе с грузом 16, создает циркуляционное нагружение контролируемого наружного кольца с рабочей частотой  $F_k$  и местное нагружение неконтролируемого внутреннего кольца испытуемого подшипника 1.

Измерителем частоты вращения 15 измеряют частоту вращения сепаратора  $F_c$  подшипника. В зависимости от вида оцениваемого отклонения от круглости дорожки качения контролируемого кольца выбирают значения числового коэффициента  $M$ :  $M = 2$  при оценке овальности;  $M = 3, 4, \dots$  при оценке огранки соответствующего порядка. Затем определяют требуемые значения частот  $F_n$  и  $F_{n'}$  из выражений (1) и  $F_{n'} = F_c \cdot Z$ , принимая  $L = 3$ . Настраивают узкополосный фильтр 9 на частоту  $F_n$ , а узкополосный фильтр 10 на частоту  $F_{n'}$ , и измеряют с помощью измерительной цепи, состоящей из блоков 5 – 12, среднеквадратические значения гармонических составляющих электрического сопротивления подшипника  $R_n$  и  $R_{n'}$  на частотах, соответственно,  $F_n$  и  $F_{n'}$ . При этом о качестве дорожки качения контролируемого кольца судят по значению диагностического параметра  $k_n$ , определяемому преобразователем отношений 13 и индицируемому устройством 14 индикации.

Рассмотрим процесс измерения среднеквадратических значений гармонических составляющих электрического сопротивления подшипника  $R_n$ ,  $R_{n'}$ , а также значения диагностического параметра  $k_n$ .

При вращении кольца подшипника, дорожка качения которого имеет отклонение от круглости, электрическое сопротивление между кольцами подшипника непрерывно изменяется. При этом функция изменения сопротивления подшипника во времени содержит гармонические составляющие, частоты которых определяются периодом отклонений формы дорожки качения контролируемого кольца подшипника. Преобразователь 6 сопротивления в напряжение формирует электрический сигнал, пропорциональный сопротивлению подшипника 1, который масштабируется в усилителе 8 в соответствии с диапазонами входных сигналов последующих блоков. Выходной сигнал усилителя 8 поступает через настроенный на частоту  $F_n$  узкополосный фильтр 9 на вход квадратичного детектора 11, выходной сигнал которого пропорционален квадрату среднеквадратического значения гармонической составляющей с

частотой  $F_n$  сигнала, формируемого усилителем 8, и, соответственно, пропорционален квадрату среднеквадратического значения гармонической составляющей сопротивления  $R_n^2$  подшипника 1. Сигнал с выхода усилителя 8 поступает также через настроенный на частоту  $F_n$  узкополосный фильтр 10 на вход квадратичного детектора 12, выходной сигнал которого пропорционален квадрату среднеквадратического значения гармонической составляющей сигнала с частотой  $F_n$ , формируемого усилителем 8, и, соответственно, пропорционален квадрату среднеквадратического значения гармонической составляющей сопротивления  $R_n^2$  подшипника 1.

Выходные сигналы квадратичных детекторов 11 и 12 поступают на входы преобразователя 13 отношений, который формирует сигнал, пропорциональный диагностическому параметру  $k_n$ . Выходной сигнал преобразователя 13 поступает на вход устройства 14 индикации, где отображается в форме, удобной для восприятия оператором.

При создании циркуляционного радиального нагружения контролируемого кольца и местного нагружения неконтролируемого кольца в зону нагружения при работе подшипника попадают различные участки дорожки качения контролируемого кольца и один и тот же участок дорожки качения неконтролируемого кольца. Наличие регулярных отклонений формы реальной дорожки качения контролируемого кольца приводит к тому, что характер взаимодействия тел качения с кольцами непрерывно изменяется. Следствием этого являются периодические изменения толщины смазочной пленки в зонах трения и, соответственно, вида функции изменения электрического сопротивления подшипника во времени и ее числовых характеристик, позволяющих оценить вид и количественные значения отклонений формы реальной дорожки качения контролируемого кольца подшипника.

Функция изменения электрического сопротивления подшипника во времени носит сложный характер. При этом, как показали исследования, при отсутствии регулярный макроотклонений дорожек качения эта функция содержит практически только одну существенную гармоническую составляющую с частотой  $F_n = F_c \cdot Z$ . В зависимости от вида отклонения формы дорожки качения контролируемого кольца в функции сопротивления возникают характерные гармонические составляющие на информационных частотах  $F_n$ , определяемых по формуле (1). Весомость характерных гармонических составляющих в общем спектре функции электрического сопротивления подшипника с увеличением значения отклонения формы значительно возрастает (в несколько раз). Это позволяет путем соответствующего задания частоты  $F_n$  и определения значения диагностического параметра  $k_n$ , установить наличие и оценить величину конкретного отклонения формы дорожки качения контролируемого кольца установленного в узле подшипника.

На рис. 3 изображена зависимость диагностического параметра  $k_n$  от значения овальности  $Q$  дорожки качения контролируемого наружного кольца подшипника типа 306, иллюстрирующая пример реализации данного способа контроля. На рис. 4

приведены зависимости диагностических параметров  $k_n$  и  $k_m$  от значения овальности дорожки качения контролируемого наружного кольца радиального шарикового подшипника типа 306, иллюстрирующие наибольшую чувствительность предложенного способа по сравнению со способом, предложенным в работе [4] и принятым за прототип.

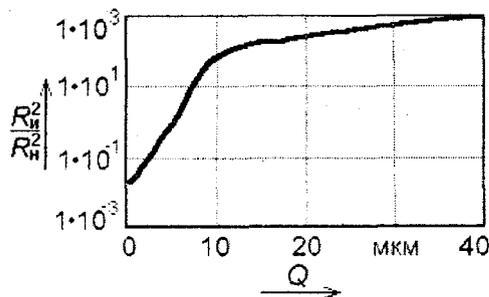


Рис. 3. Зависимость параметра  $k_n$  от значения овальности дорожки качения контролируемого наружного кольца подшипника типа 306

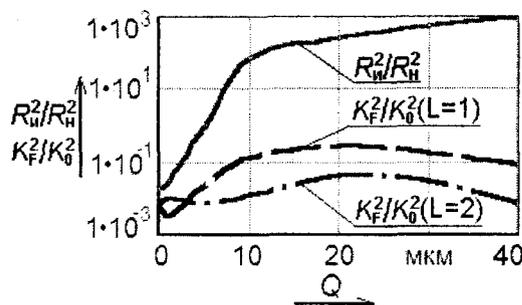


Рис. 4. Зависимости параметров  $k_n$  и  $k_m$  от значения овальности дорожки качения наружного кольца подшипника типа 306

**Контрольный пример**

Проводили контроль наружного кольца подшипника качения типа 306 (ГОСТ 8338-75), смазанного пластичным смазочным материалом Литол-24 (ГОСТ 21125-87). С помощью устройства, построенного по принципу, изложенному в работе [1], моделировали отклонения от круглости дорожки качения наружного кольца в виде овальности различных значений. Вращали внутреннее кольцо с частотой 900 мин<sup>-1</sup>, что соответствует  $F_k = 15$  Гц. За счет дисбаланса вала создавали радиальное циркуляционное нагружение в 3000 Н контролируемого наружного кольца и местное нагружение неконтролируемого внутреннего кольца. Измеряли частоту вращения сепаратора  $F_c = 5,7$  Гц. Для оценки овальности в широком диапазоне с учетом  $Z = 8$  выбрали значения числовых коэффициентов  $M = 2$ ,  $L = 3$  и рассчитали значения частот  $F_n = 135,6$  Гц,  $F_m = 45,6$  Гц. Затем моделировали различные значения овальности наружного кольца, для каждого значения измеряли среднеквадратические значения гармонических составляющих сопротивления подшипника на частотах  $F_n = 45,6$  Гц и  $F_m = 135,6$  Гц и определяли значение параметра  $k_n$ , по которому судили об овальности дорожки качения контролируемого кольца.

Полученный график параметра  $k_n$  от овальности  $Q$  наружного кольца контролируемого ПК (рис. 3) подтверждает возможность и эффективность оценки отклонений формы дорожек качения колец ус-

тановленных в узле подшипников предложенным способом. Для сравнения приведены графики зависимостей параметра  $k_n$  (получены по предлагаемому способу) и параметра  $k_m$  (получены по способу, предложенному в работе [4] при  $L = 1$  и  $L = 2$ ) от значения овальности дорожки качения контролируемого наружного кольца ПК, иллюстрирующие наибольшую чувствительность предложенного способа по сравнению с прототипом (рис. 4).

#### Выводы

Предложенный способ обеспечивает возможность оценки регулярных отклонений формы реальных дорожек качения ПК при высокой чувствительности к значениям отклонений. В отличие от параметра НИВ, электрическое сопротивление не теряет чувствительности к значениям отклонений формы дорожки качения контролируемого кольца при жидкостной и граничной смазках в подшипнике, что расширяет области применения и повышает досто-

верность контроля качества колец установленного в узле ПК при проведении механосборочных работ в процессе изготовления, сборки и ремонта ТС.

#### Литература:

- 1 Подмастерьев К.В. Электрофлукуационные методы комплексного диагностирования опор качения. – М.: Машиностроение-1, 2001. – С. 243.
- 2 Авторское свидетельство СССР № 1176197, МКИ G 01 M 13/04. Способ контроля качества подшипников / И.С. Ледовской и др., 1984.
- 3 Корндорф С.Ф. О возможности дефектации неразборных подшипников качения электрическим методом / С.Ф. Корндорф, К.В. Подмастерьев // Дефектоскопия, 1985. – N5. – С.88-90.
- 4 Патент 2154264 РФ, МКИ G 01 M 13/04. Способ контроля качества колец подшипников качения / К.В. Подмастерьев, В.В. Мишин. – Опубл. 10.08.2000, БИПМ № 22.

УДК 621.3

Канд. техн. наук, доц. Пахолкин Е.В., асп. Фокин Н.Н.  
(Орловский государственный технический университет)  
Россия, г. Орел, тел. (4862)419876; e-mail: Eugene\_P@bk.ru, pms35@mail.ostu.ru

## ПРИМЕНЕНИЕ ЧЕТЫРЕХШАРИКОВОЙ СХЕМЫ ТРЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЯЗКОСТНО-ТЕМПЕРАТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

*In this article is showing the results of simulation electric processes in zone of friction in four-ball test. The Object of the simulation is processes, occurring in zone of friction, micro contacting in lubrication film. A result of Simulation of micro contacting in lubrication film is showing in this article. A result of Simulation of micro contacting in lubrication film is extending usability and applicability of standard four-ball test devices and apparatus that using in engine oil diagnostics.*

#### Актуальность проблемы

Машины трения широко применяются для испытаний смазочных материалов, а также материалов, предназначенных для изготовления деталей различных трибосопряжений. Учитывая многообразие условий и режимов трения, имеется ряд образцов испытательного оборудования – машин трения [1].

Наиболее распространенным и информативным методом определения эффективности смазывающих свойств масел является «Метод четырех шариков», который реализуется с помощью четырехшариковой машины трения (ЧШМ). Этот метод является стандартизованным (ГОСТ 9490. Материалы смазочные жидкие и пластичные. Метод определения трибологических характеристик на четырехшариковой машине) и соответствует международным стандартам DIN 51 350, ASTM D 2266. С помощью машины трения моделируется трение скольжения на поверхности шариков; при этом три нижних шарика закреплены в чашке и неподвижны, а верхний шарик совершает движение с постоянной скоростью.

Вязкостно-температурные свойства – одна из важнейших характеристик моторного масла. От этих свойств зависит диапазон температуры окружающей среды, в котором данное масло обеспечивает пуск двигателя без предварительного подогрева, беспрепятственное прокачивание масла насосом по смазочной системе, надежное смазывание и охлаждение деталей двигателя при наибольших допустимых нагрузках и температуре окружающей среды. Даже в умеренных климатических условиях диапазон изменения температуры масла от холодного пуска зимой до максимального прогрева в подшипниках коленчатого вала или в зоне поршневых колец составляет до 180 – 190 °С. Вязкость минеральных масел в интервале температур от -30 до +150 °С изменяется в тысячи раз. Летние масла, имеющие достаточную вязкость при высокой температуре, обеспечивают пуск двигателя при температуре окружающей среды около 0 °С. Зимние масла, обеспечивающие холодный пуск при отрицательных температурах, имеют недостаточную

вязкость при высокой температуре. Таким образом, сезонные масла независимо от их наработки (пробега автомобиля) необходимо менять дважды в год. Это усложняет и удорожает эксплуатацию двигателей. Проблема решена созданием всесезонных масел, загущенных полимерными присадками (полиметакрилаты, сополимеры олефинов, полиизобутилены, гидрированные сополимеры стирола с диенами и др.).

Вязкостные присадки относительно слабо повышают вязкость базового масла при низкой температуре, но значительно увеличивают ее при высокой температуре, что обусловлено увеличением объема макрополимерных молекул с повышением температуры и рядом иных эффектов.

Характеристиками вязкостно-температурных свойств служат *кинематическая вязкость*, обычно определяемая в капиллярных вискозиметрах, и *динамическая вязкость*, измеряемая при различных градиентах скорости сдвига в ротационных вискозиметрах, а также *индекс вязкости* – безразмерный показатель пологости вязкостно-температурной зависимости, рассчитываемый по значениям кинематической вязкости масла, измеренной при 40 и 100 °С (ГОСТ 25371–82). В нормативной документации на зимние масла иногда нормируют кинематическую вязкость при низких температурах. Индекс вязкости минеральных масел без вязкостных присадок составляет 85–100. Он зависит от углеводородного состава и глубины очистки масляных фракций. Синтетические базовые компоненты имеют индекс вязкости 120–150, что дает возможность получать на их основе всесезонные масла с очень широким температурным диапазоном работоспособности.

Не смотря на то, что основным нормируемым параметром для моторных масел является вязкость, многие публикации (а также исследования, проводимые с участием авторов) подтверждают тот факт, что вязкость в качестве диагностического параметра мало пригодна для оценки качества моторного масла: в процессе эксплуатации масла вязкость может как увеличиться, так и уменьшиться [2, 3]. При этом можно утверждать и о слабых корреляционных связях вязкости с такими параметрами и характеристиками масел как оптическая плотность (оценка степени загрязненности), щелочное число, количество продуктов деструкции в смазочном материале [3].

Вязкостно-температурные свойства в этом отношении являются более информативным диагностическим признаком. Исследование индекса вязкости позволяет не только дать оценку работоспособности смазочного материала, но и косвенным образом исследовать уровень срабатывания вязкостных присадок. Таким образом, проблема создания методов и средств диагностирования смазочных материалов по вязкостно-температурным характеристикам является актуальной, особенно с учетом уровня стоимости современного оборудования, на котором реализуются стандартные процедуры исследования вязкости в условиях управляемого температурного фактора.

Цель данной работы – обоснование электрического метода диагностирования смазочных материалов, в частности, определение возможности приме-

нения параметра НИВ для исследования вязкостно-температурных свойств смазочных материалов при использовании четырехшариковой схемы трения.

Положительные результаты данного исследования не только дают предпосылки к совершенствованию известного метода испытаний за счет применения дополнительного электрического диагностического параметра, но и позволяют обосновать принцип создания более простых и дешевых технических средств для решения рассматриваемой задачи.

#### Содержание теоретических исследований

Параметр НИВ определяется как отношение времени электрического микроконтактирования деталей трибосоприжения ко времени измерения. Согласно [4], при бесконечном времени измерения НИВ стремится к вероятности микроконтактирования.

Вероятность микроконтактирования между двумя соседними микронеровностями  $P_{\text{МК}}$  составляет:

$$P_{\text{МК}} = \left( 0,5 - \Phi \left( \frac{h}{\sqrt{R_{q1}^2 + R_{q2}^2}} \right) \right), \quad (1)$$

где  $h$  – средняя толщина смазочного слоя;

$R_{q1}, R_{q2}$  – параметры шероховатости контактирующих поверхностей;

$\Phi$  – интегральная функция нормального распределения.

Вероятность микроконтактирования  $n$  микронеровностей  $P_{\text{К}}$  составляет:

$$P_{\text{К}} = 1 - (1 - P_{\text{МК}})^n. \quad (2)$$

Из (2) вероятность микроконтактирования по 3-м парам поверхностей всех шариков составит:

$$P_{\text{Х}} = 1 - (1 - P_{\text{МК}})^{3n}. \quad (3)$$

Очевидно, что совокупность выражений (1) – (3) для построения полной модели электрического контактирования должна быть дополнена системой уравнений гидродинамики смазки, решение которой определяется относительно параметра  $h$ .

Зазор между двумя шарами до деформации на узком участке с большой степенью точности может быть представлен в виде:

$$h(x, y) = 2 \cdot \frac{x^2}{R} + 2 \cdot \frac{y^2}{R} + h_{m1}, \quad (4)$$

где  $h_{m1}$  – толщина смазочного слоя;

$x, y$  – координаты в декартовом пространстве;

$R$  – радиус шариков.

Уравнение давления для смазочной пленки, выведенное Рейнольдсом, имеет вид:

$$\frac{d}{dx} \left( h^3 \cdot \frac{dP}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left( h^3 \cdot \frac{dP}{dy} \right) = 6 \cdot \eta \cdot V \cdot \frac{dh}{dx}, \quad (5)$$

где  $V$  – эффективная скорость скольжения, равная скорости движущейся поверхности трибосоприжения при условии неподвижности другой поверхности;

$P$  – гидродинамическое давление;

$\eta$  – динамическая вязкость.

Учитывая симметрию шариков при  $y = 0$ , из уравнения (5) получим:

$$P = \frac{12 \cdot \eta \cdot V}{R} \cdot \frac{a^3 + x^3}{\left(2 \cdot \frac{x^2}{R} + h_{m1}\right)^3}, \quad (6)$$

где  $a$  – координата начала зоны трения.

Для нахождения границы смазочного слоя, удовлетворяющей условию  $P \geq 0$ , по уравнению (6), используют итерационный метод [4]. Сначала задают нулевые граничные условия и решают соответствующее уравнение. Если при решении получаются отрицательные давления, то координату  $a$  начала зоны трения изменяют до тех пор, пока не будет получено решение с положительными давлениями (рис. 1).

Из (5) следует, что

$$\frac{d}{dx} \left( h^3 \cdot \frac{dP}{dx} \right) = 6 \cdot \eta \cdot V \cdot \frac{dh}{dx} - \frac{d}{dy} \left( h^3 \cdot \frac{dP}{dy} \right), \quad (7)$$

откуда:

$$P = \frac{R^3}{8} \left[ \frac{d}{dx} \left( h^3 \frac{dP}{dx} \right) - 6\eta V \frac{dh}{dx} \right] \times \left[ \left( \frac{2x^2}{R} + \frac{2y^2}{R} + h_{m1} \right)^{-3} + \left( \frac{2x^2}{R} + 2R + h_{m1} \right)^{-3} \right]. \quad (8)$$

Из (8) получаем подъемную силу, действующую на поверхности трения из условия

$$F_{\text{пол}} = \iint P ds. \quad (9)$$

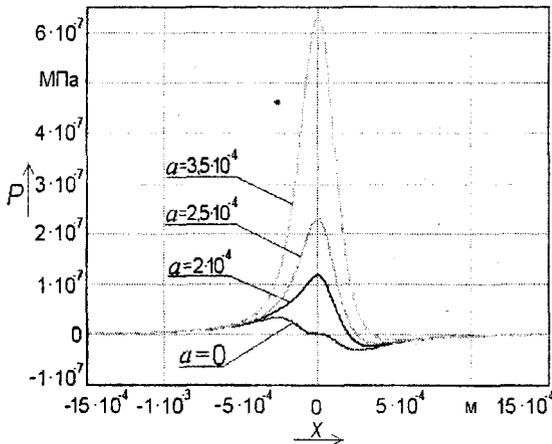


Рис. 1. Зависимость давления  $P$  от координаты  $x$  при различных значениях координаты  $a$

#### Учет деформации поверхностей трения

Построить адекватную модель трения можно лишь на основе изучения напряженно – деформированного состояния зоны контакта, опираясь на решения контактных задач механики твердого деформированного тела. При решении подобных задач сталкиваются с большой группой факторов, среди которых дискретность контакта, разнообразие типов деформирования неровностей даже в пределах одной области контакта, неоднородность свойств материалов по поверхности и глубине, изменение этих свойств в процессе трения, в частности под влиянием фрикционного нагрева, и многие другие. Современная теория учитывает перечисленные факторы, но, как правило, по отдельности. Рис. 2 иллюстрирует изменение зазора в зоне трения с учетом деформационной составляющей  $\Delta$ .

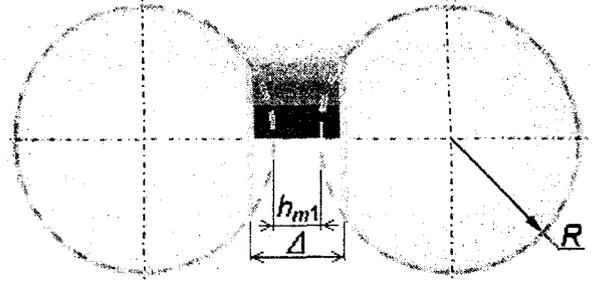


Рис. 2. Учет деформации

Параметр  $\Delta$  определяется из выражения:

$$\Delta = \frac{A' \cdot P'}{E} + h_{m1}, \quad (10)$$

где  $A'$  – коэффициент пропорциональности между прогибом поверхности и отношения гидродинамического давления к модулю упругости;  $P'$  – давление на трущейся поверхности.  $E$  – приведенный или эффективный модуль упругости трущихся поверхности.

Заменяя переменную  $h_{m1}$  на параметр  $\Delta$ , модифицируем ранее полученные выражения (6) и (8):

$$\begin{cases} P = -\frac{12\eta V}{R} (a^3 + x^3) \left( \frac{2x^2}{R} + \Delta \right)^{-3}, \\ P = \frac{R^3}{8} \left[ \frac{d}{dx} \left( h^3 \frac{dP}{dx} \right) - 6\eta V \frac{dh}{dx} \right] \times \left[ \left( \frac{2x^2}{R} + \frac{2y^2}{R} + \Delta \right)^{-3} + \left( \frac{2x^2}{R} + \frac{2y^2}{R} + \Delta \right)^{-3} \right]. \end{cases} \quad (11)$$

На рис. 3 и 4 представлены зависимости вероятности микроконтактирования  $P_k$  и средней толщины смазочного слоя  $h$  от температуры  $t$  при смазывании трибосопряжения маслом М-8.

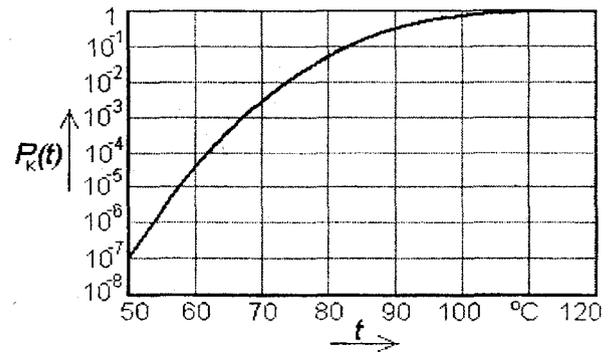


Рис. 3. График зависимости  $P_k(t)$

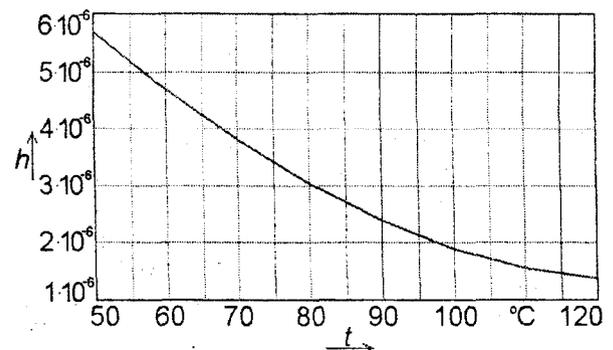


Рис. 4. График зависимости  $h(t)$

**Заключение**

Анализ рис. 3 и 4 позволяет сделать вывод, что изложенная методика расчета параметра НИВ для контакта, реализуемого четырехшариковой схемой трения, позволяет получить, с одной стороны, завышенные значения толщины смазочного слоя  $a$ , с другой стороны, заниженные значения диагностического параметра. Это объясняется упрощенным подходом при решении рассмотренной математической модели. В частности, при нахождении результата не учитывалась деформация рабочих поверхностей, что в конечном итоге привело к завышению найденной средней толщины смазочного слоя.

Однако, данный недостаток математической модели, снижающий ее достоверность, не является принципиальным с учетом специфики решаемой проблемы. Основным результатом математического моделирования является не оценка абсолютных значений толщины смазочного слоя в зонах трения и соответствующего значения диагностического параметра, а оценка изменения диагностического параметра в зависимости от изменения температуры.

Полученное изменение НИВ на 7 порядков при соответствующем изменении температуры на 50 °C представляется убедительным обоснованием эффективности рассмотренного диагностического параметра (при условии обеспечения уровня НИВ в диапазоне от  $10^{-7}$  до  $10^{-3} \dots 10^{-1}$  за счет рационального выбора условий и режимов диагностирования при использовании четырехшариковой схемы трения).

При этом абсолютное значение параметра можно изменять с помощью частоты вращения привода и силы нагружения  $P_{к(t)}$  трибосопряжения.

**Литература:**

- 1 Пахолкин Е.В. Инструментальные проблемы исследований физико-механических процессов в зонах трения трибосопряжений / Е.В. Пахолкин, Н.А. Сотникова // Известия ОрелГТУ. – Сер. Машиностроение. Приборостроение. – Орел, ОрелГТУ, 2003. – С. 45-50.
- 2 Пахолкин Е.В. Методика и оборудование для проведения экспериментальных исследований моторных масел в процессе эксплуатации / Е.В. Пахолкин, С.Н. Сычев, Н.С. Севрюгина // Сб. тр. международ. науч.-техн. конф. «Приборостроение-2005». – Винница-Ялта, 2005. – С. 177-181
- 3 Пахолкин Е.В. Инструментальное и методическое обеспечение дизелькометрического метода диагностирования моторных масел / Е.В. Пахолкин, Н.С. Севрюгина // Известия ОрелГТУ. – Сер. Машиностроение. Приборостроение. – Орел: ОрелГТУ, 2005. – № 2. – С. 38-42.
- 4 Подмастерьев К.В. Электропараметрические методы комплексного диагностирования опор качения / К.В. Подмастерьев – М.: Машиностроение, 2001. – 376 с.
- 5 Коднир Д.С. Контактная гидродинамика смазки деталей машин. – М.: Машиностроение, 1976. – 304 с.

УДК 620.179.1.082.7:658.58

Канд. техн. наук, доц. Мишин В.В., асп. Сидоров А.М.  
(Орловский государственный технический университет)  
Россия, г. Орел, тел. (4862)419876; E-mail: pms35@mail.ostu.ru  
Работа выполнена в соответствии с грантом МК-3824.2005.8

## СТЕНДОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРИРАБОТКИ И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПОДШИПНИКОВ

*In clause, the brief description of the bench equipment presented. The equipment intended for diagnosing bearings rolling and bearings of sliding. Stands allow engineers to prepare bearings for installation in precision mechanisms.*

Подшипники качения и скольжения находят широкое применение при производстве машин и механизмов. Процесс сборки подшипникового узла является одним из основных этапов технологического процесса изготовления механизма. Поставляемый с предприятия-изготовителя подшипник качения обычно подвергается входному контролю. При этом дополнительно к контролю качества на предприятии-изготовителе проводится контроль размерных параметров, расконсервация подшипника и оценка технического состояния. В ряде случаев входной контроль является номинальной операцией техпроцесса. Типовой технологический процесс сборки механизма после проведения указанных операций подразумевает установку подшипника в узел. После сборки узла производится операция технологиче-

ской прикатки (прогона, приработки) подшипника в составе изделия. На этом этапе добиваются достижения равновесной шероховатости поверхностей трения, равномерного распределения смазочного материала и стабилизации температурного режима. Однако, по мнению многих авторов такое построение технологического процесса сборки механизма не является оптимальным по критерию обеспечения качества и надежности механизма при его эксплуатации. Это обусловлено тем, что при приработке в узле процесс приработки не является адаптивным по отношению к конкретному подшипнику.

Известно, что время приработки для подшипников одной партии (как и качество самих подшипников) может сильно варьироваться. Особенно это обстоятельство актуально для высокоточных

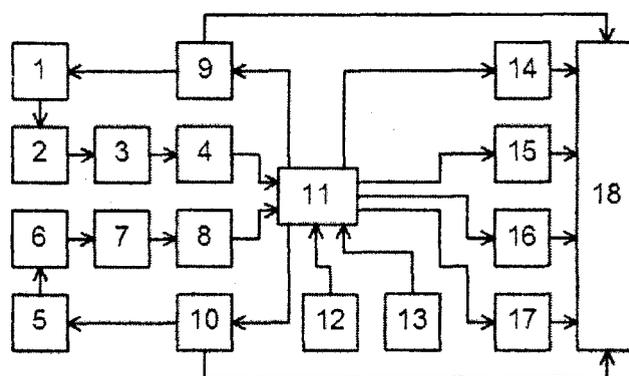
прецизионных узлов приборов и устройств с заданным малым моментом сопротивления вращению. Как известно, в процессе приработки подшипника момент трения снижается в некоторых случаях до нескольких порядков, однако оценка момента трения в процессе приработки весьма сложная и трудоемкая задача (особенно при приработке подшипника в узле). В настоящей работе предлагается стендовое оборудование для осуществления приработки подшипника до установки в изделие. Причем процесс приработки совмещен с процессом полного диагностирования технического состояния подшипника, с применением электрических, температурных и вибрационных методов. Данное оборудование позволит осуществить адаптивную приработку высокоточных подшипников для прецизионных узлов, при этом приработка в составе узла не исключается. Также данное оборудование используется для проведения НИР по разработке новых методов диагностирования подшипников.

Структурная схема универсального стенда приработки, комплексного контроля и диагностики подшипников скольжения представлена на рис. 1. При этом может осуществляться как тестовое диагностирование (при воздействии некоторых специфических воздействий), так и рабочее диагностирование (при работе в режимах, соответствующих эксплуатационным) подшипникового узла. Данные возможности стенда обеспечиваются наличием в его конструкции специальных узлов и блоков.

В качестве методов диагностирования выбраны: вибрационный, тепловой и электрический. Вибрационный метод является наиболее распространенным при контроле подшипниковых узлов и, как следствие, наиболее развитым. Сущность вибрационного метода заключается в измерении и анализе параметров виброакустического сигнала, излучаемого самим подшипником при его работе (рабочее диагностирование) или исследовании частотных характеристик канала «излучатель – подшипник – первичный преобразователь». Методы данной группы обеспечивают усредненную комплексную оценку состояния подшипника, а также решают целый комплекс конкретных диагностических задач. В качестве примера можно назвать, в частности, оценку структурных параметров подшипника, сформировавшихся под влиянием технологических погрешностей изготовления и сборки подшипника (отклонения от круглости поверхностей трения, зазоры и углы контактов). При использовании тепловых методов большую практическую ценность представляет определение тепловыделений непосредственно из контактных зон деталей, что позволяет оценить характер взаимодействия отдельных деталей подшипника и, следовательно, его состояние. Электрические методы широко применяются при оценке технического состояния трибосопряжений различных видов на протяжении многих десятилетий, эффективно используются для решения многих трибологических задач [1].

*Состав и краткое описание принципа действия стенда.* Устройством управления 1 взаимодействующим с электросиловым узлом 2 задается скорость вращения электродвигателя 3. Электродвигатель через гибкую связь 4 передает вращение к валу,

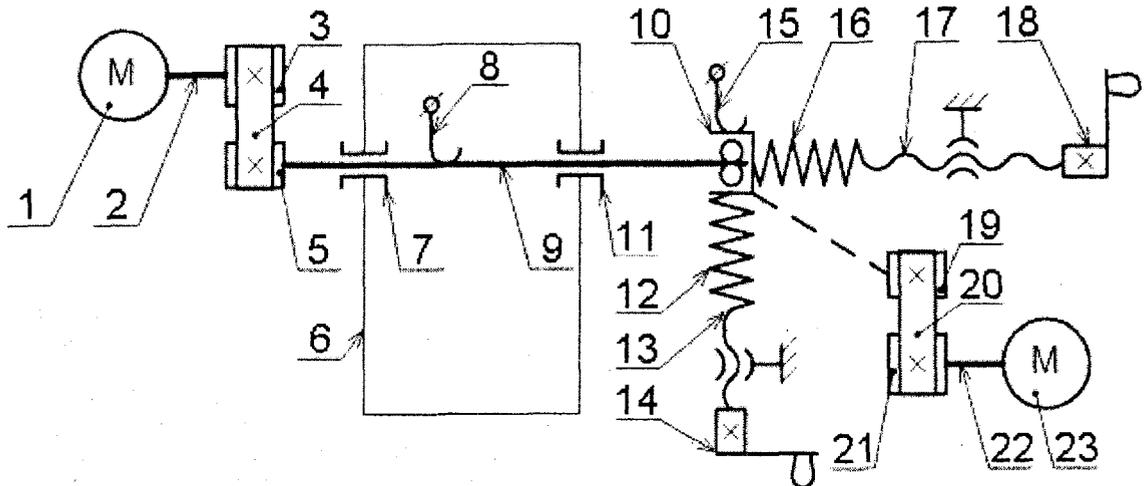
на котором установлен контролируемый подшипник 11. Для вращения внешнего кольца подшипника предусмотрена схема, также состоящая из устройства управления 5, электросилового узла 6, шагового двигателя 7 и гибкой связи 8. Для контроля скорости вращения вала и внешнего кольца подшипника, соответственно, предусмотрены блоки 9 и 10, которые по средствам обратной связи взаимодействуют с устройствами управления 1 и 5. Это позволяет более точно стабилизировать частоту вращения колец подшипника. Для обеспечения требуемой нагрузки подшипниковой опоры, в конструкции стенда предусмотрены узлы радиального и осевого нагружения, соответственно блоки 12 и 13. Значения контролируемых параметров при помощи токосъемных устройств 14 и 15, датчика вибрации 16, датчика температуры 17 и устройств контроля скорости вращения 9 и 10, поступают на измерительную систему 18, где и происходит их дальнейшая обработка.



1, 5 – устройство управления; 2, 6 – электросиловый узел; 3, 7 – электродвигатель; 4, 8 – гибкая связь; 9, 10 – устройство контроля скорости вращения; 11 – исследуемый подшипник; 12 – узел осевого нагружения; 13 – узел радиального нагружения; 14, 15 – токосъемный узел; 16 – датчик вибрации; 17 – датчик температуры; 18 – измерительная система

**Рис. 1. Структурная схема стенда приработки подшипников качения**

Устройство механической части стенда поясняется кинематической схемой, представленной на рис. 2. Электродвигатель 1, на валу 2 которого закреплен шкив 3, передает вращение посредством ремня 4 на шкив 5. Шкив 5 соединен с основным валом 9, на конце которого установлен прикатываемый подшипник 10. Основной вал установлен в корпусе 6 на двух опорах 7 и 11. Устройства радиального и осевого нагружения имеют одинаковое конструктивное исполнение и представлены, соответственно, в виде пружин 12 и 16 которые преобразуют перемещение ходовых винтов 13 и 17 в усилие, передаваемое на внешнее кольцо подшипника. На внешнее кольцо подшипника передается вращение с шагового электродвигателя 23 посредством ременной передачи (позиции 19, 20 и 21). Для осуществления электрических методов диагностирования необходимо обеспечить электрический контакт с основным валом. Эту функцию выполняют токосъемные узлы 8 и 15. Для датчиков вибрации и температуры предусмотрены специальные установочные позиции (условно не показаны).



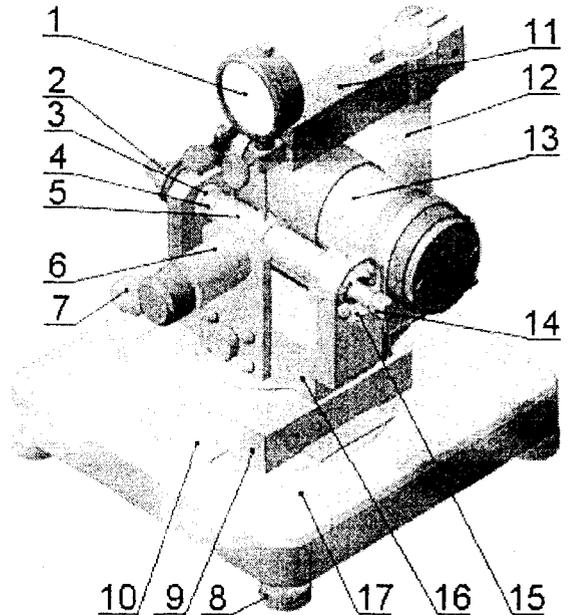
1, 23 – электродвигатель; 2, 22 – вал электродвигателя; 3, 5, 19, 22 – шкив; 4, 20 – ремень; 6 – корпус; 7, 11 – опоры вала; 8, 15 – токосъемник; 9 – основной вал; 10 – прикатываемый подшипник; 12, 16 – пружина; 13, 17 – винтовая пара; 14, 18 – рукоятка

Рис. 2. Кинематическая схема механической части стенда

Особенности конструктивного исполнения стенда. Вращение с электродвигателя на основной вал передается при помощи ременной передачи. Ременная передача является частным случаем гибкой связи, и ее применение позволяет снизить значение вибрации, передаваемое от электродвигателя к контролируемому подшипнику, что в свою очередь ведет к повышению качества диагностирования. Значение усилия, передаваемого от устройства радиального нагружения на каждую из опор скольжения, может быть заранее определено. При этом на вал также передается усилие от ременной передачи, которое зависит как от момента трения опор скольжения, так и от скорости вращения. Однако, значение этого усилия мало по сравнению с усилием от устройства радиального нагружения, и его значением в большинстве случаев можно пренебречь. Для получения адекватных результатов исследования при использовании электрического метода диагностирования, необходимо обеспечить электрическую изоляцию вала и корпуса во всех местах кроме места контакта с исследуемой опорой. Это достигается применением электроизоляционных втулок.

На рис. 3 представлена трехмерная модель конструкции стенда. Стенд смонтирован на основании, установленном на четырех регулируемых по высоте опорах. На основании закреплен предметный столик с корпусом двухопорного узла. Предметный столик может перемещаться по трем степеням свободы (по двум горизонтальным осям и поворот относительно вертикальной оси) с целью обеспечения необходимого положения для измерения биений и отклонений от круглости соответственно вала и кольца подшипника. Предметный столик фиксируется специальным механизмом при повороте фиксирующего винта. Для точной юстировки предметного столика относительно основания на нем закреплены два табла с нанесенной на них шкалой (шкала на рисунке не изображена). В основании также установлена стойка, на которой закреплен держатель с индикатором часового типа (для измерения биений и отклонений от круглости). На корпусе закреплен электродвига-

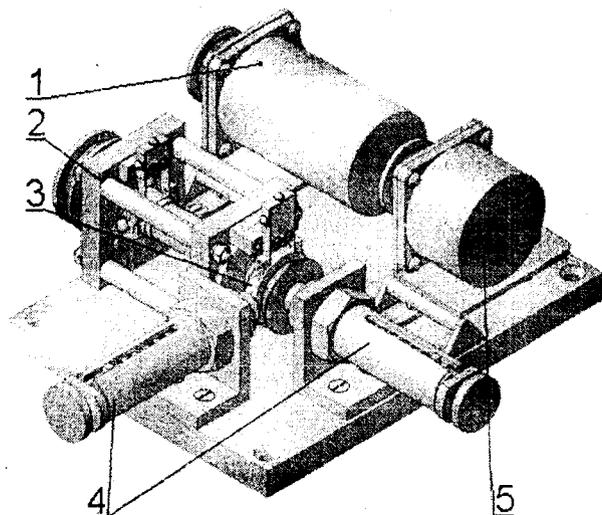
тель, от которого через ременную передачу передается вращение на основной вал. Вал установлен в корпусе на двух опорах скольжения (диагностируемой и вспомогательной). Также на корпусе закреплено устройство радиального нагружения подшипника. Вспомогательная опора скольжения и устройство радиального нагружения электрически разделены с валом при помощи фторопластовых втулок.



1 – индикатор часового типа; 2 – шкив; 3 – фторопластовая втулка; 4 – втулка токосъемника; 5 – основной вал; 6 – устройство радиального нагружения; 7 – фиксирующий винт; 8 – регулируемая опора; 9 – предметный столик; 10 – табла шкалы; 11 – держатель; 12 – стойка; 13 – электродвигатель; 14 – винт распорный; 15 – фиксирующая крышка; 16 – корпус; 17 – основание

Рис. 3. Трехмерная модель стенда для приработки и диагностирования подшипников скольжения

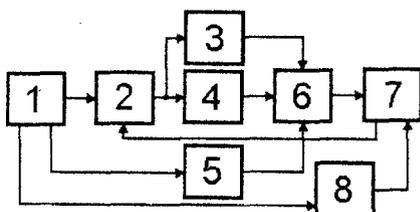
Для проведения приработки и диагностирования подшипников качения разработан аналогичный стенд, представленный на рис. 4.



1 – привод; 2 – двухопорный узел; 3 – узел исследуемого подшипника; 4 – устройства радиального и осевого нагружения; 5 – привод наружного кольца

**Рис. 4. Стенд для приработки и диагностирования подшипников качения**

Стенд работает аналогично вышеописанному. Привод через ременную передачу вращает вал двухопорного подшипникового узла. Исследуемый подшипник установлен на валу и подвержен радиальной и осевой нагрузке. Для обеспечения приработки всех рабочих поверхностей подшипника в стенде предусмотрен дополнительный привод для вращения наружного кольца, позволяющий также оценить качество поверхности дорожек качения как внутреннего, так и наружного колец с применением электрических методов диагностирования. Электрический метод диагностирования можно использовать при одновременном вращении двух колец подшипника. Виброакустический сигнал можно получать только при вращении внутреннего кольца. Это обусловлено особенностями установки и крепления первичного преобразователя.

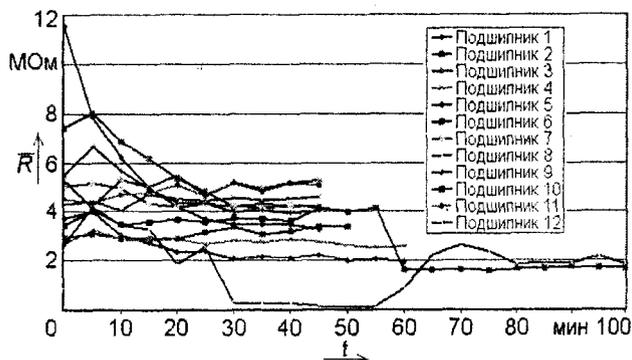


1 – объект диагностирования (подшипник); 2 – коммутационное устройство; 3 – канал аналогового измерения НИВ; 4 – канал аналогового измерения  $R$  и  $U$ ; 5 – канал измерения вибрации; 6 – согласующее устройство; 7 – система сбора данных; 8 – система контроля кинематики

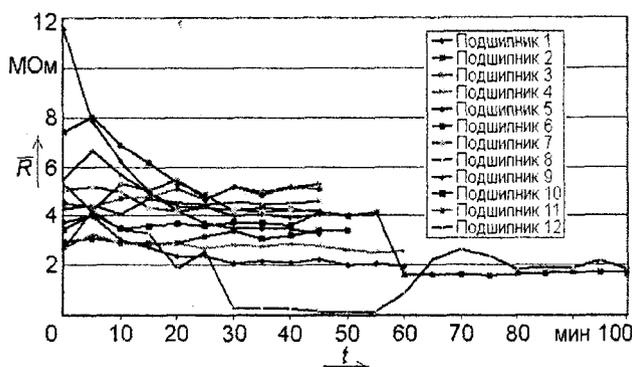
**Рис. 5. Структура измерительного устройства**

Указанные механические стенды комплектуются измерительным оборудованием, построенным в соответствии со структурной схемой (рис. 5). Диагностируемый подшипник или подшипниковый узел через коммутационное устройство поочередно подключается к входным цепям измерителя нормированного времени микроконтактирования деталей подшипника (НИВ) (канал аналогового измерения

НИВ 3) и измерителя электрического сопротивления  $R$  (канал 4 аналогового измерения  $R$  и  $U$ ). При этом система по параллельному каналу 5 производит регистрацию сигнала вибрации. Согласующее устройство 6 приводит уровни выходных сигналов всех каналов к унифицированным уровнями системы сбора данных. Предусмотрена также регистрация кинематических параметров узла с помощью блока 8.

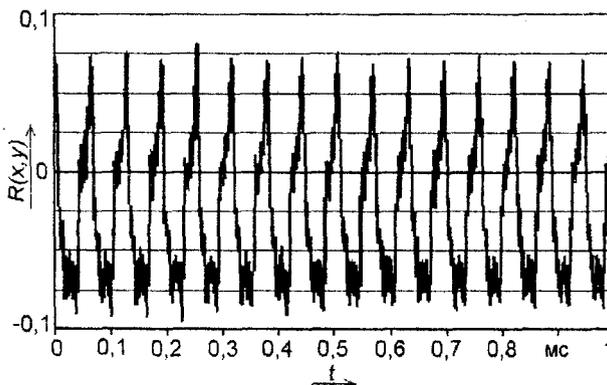


**Рис. 6. Диаграмма изменения среднего значения сопротивления при приработке подшипника**



**Рис. 7. Диаграмма изменения избыточно температуры при приработке подшипника**

В качестве примеров на рис. 6, 7 соответственно, представлены диаграммы, характеризующие процесс приработки подшипников при измерении среднего сопротивления подшипника и избыточной температуры. Как видно, в процессе приработки данные параметры претерпевают значительные изменения.



**Рис. 8. Диаграмма изменения избыточной температуры при приработке подшипника**

На рис. 8 представлен график временной взаимной корреляционной функции  $R(x,y)$  сигнала вибрации и сигнала электрического сопротивления подшипника качения. Как видно из графика, функция

$R(x,y)$  содержит четко выраженные гармонические составляющие, характерные для выбранных режимов работы подшипника.

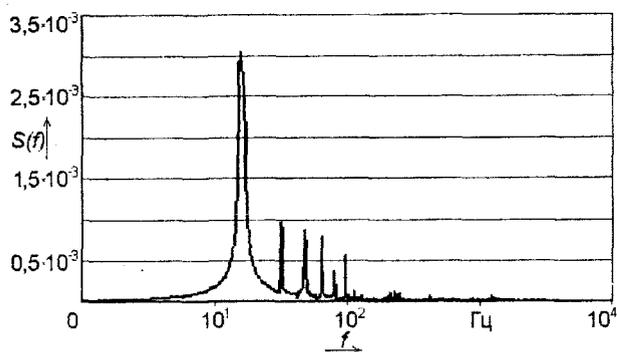


Рис. 9. Диаграмма изменения избыточной температуры при приработке подшипника

На рис. 9 представлен взаимный спектр сигналов сопротивления и вибрации. При этом производилось унифицирование и масштабирование сигналов. Полученный спектр доказывает возможность совместного применения двух разнородных диагностических параметров – вибрации и электрических параметров. Такой подход позволит значительно повысить помехозащищенность и достоверность метода диагностирования, что позволит проводить приработку и сборку подшипникового узла на более качественном уровне.

**Литература:**

1 Свириденко А.И. Акустические и электрические методы в триботехнике [Текст] / А.И. Свириденко, Н.К. Мышкин, Т.Ф. Калмыкова, О.В. Холодилов. – Минск: Наука и техника, 1987. – 257 с.

УДК 620.179.1.082.7:658.58

Ст. преп. Захаров М.Г.  
(Орловский государственный технический университет)  
Россия, г. Орел, тел. (4862)419876; E-mail: [pms35@mail.ostu.ru](mailto:pms35@mail.ostu.ru)

## ОСОБЕННОСТИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ ЭЛЕКТРОПАРАМЕТРИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

*Features of diagnosing of pairs friction are consider by electro parametrical methods. Electric equivalent circuits of elementary contact cells are resulted. The situations arising at diagnosing of pairs of friction are considered. Allowable conditions of authentic reception of the diagnostic information are determined.*

**Введение**

Качество функционирования технических устройств и систем различного назначения в отдельных случаях в значительной мере зависит от технического состояния используемых в них трибосопряжений. Это обстоятельство предопределяет необходимость выполнения в ответственных ситуациях диагностирования указанных трибосопряжений, которое, для решения ряда задач, может быть выполнено электропараметрическими методами.

Особенностью использования электропараметрических методов является создание замкнутого электрического контура, образованного трибосопряжением и средством диагностирования с источником электрической энергии. Ток, протекающий в образованном контуре, несет информацию о состоянии трибосопряжения, а его параметры используются в качестве диагностических.

Однако ток, протекающий в измерительной цепи, вызывается не только током источника электрической энергии средства диагностирования, а является суммарным током, определенный вклад в который вносят токи, генерируемые в процессе работы самим трибосопряжением. Это обстоятельство может рассматриваться неоднозначно. С одной стороны, ток, генерируемый трибосопряжением в процессе работы, несет дополнительную информацию о процессах, протекающих в зоне трения. С другой стороны,

эти же составляющие тока при определенных условиях могут являться помехой при реализации электропараметрических методов диагностирования.

Приведенные обстоятельства указывают на особенности диагностирования трибосопряжений электропараметрическими методами и предъявляют определенные требования как к подходам разработки и использования средств диагностирования, так и к методам получения и обработки диагностической информации.

**Основная часть**

Использование электропараметрических методов для диагностирования трибосопряжений, прежде всего, базируется на представлении зоны трения в виде электрической схемы замещения, эквивалентной протекающим в ней процессам. Физические явления, проходящие в зонах трения взаимодействующих поверхностей, в том числе и электрические, носят сложный, до конца неизученный флуктуационный характер. Тем не менее, основываясь на результатах ряда исследований, можно указать наиболее часто приводимые и во многом совпадающие схемы замещения трибосопряжений, которые, по мнению их авторов, достаточно адекватно отражают доминирующие физические процессы, протекающие при контактном взаимодействии рабочих поверхностей в различных условиях.

Работа трибосопряжения в режиме сухого трения характеризуется непосредственным контактом рабочих поверхностей по вершинам микронеровностей. Схема замещения элементарной контактной ячейки для этого случая может быть представлена, генератором термо-ЭДС  $e_t$ , резистором  $r_t$ , позволяющим учесть контактное сопротивление, а также конденсатором  $C_t$ , замещающим участок растекания тока по промежутку образованному контактирующими микровыступами (рис. 1, а) [1].

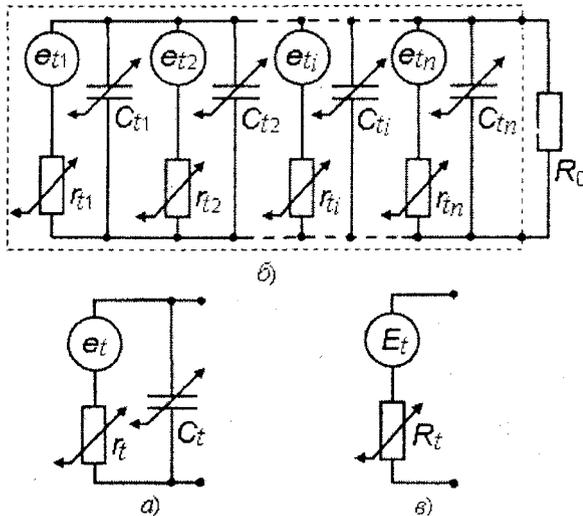


Рис. 1. Элементарная контактная ячейка (а), схема замещения трибоконтакта (б) и обобщенная схема контакта при сухом трении (в)

Осуществление контакта поверхностей в рабочих условиях, происходящее по множеству микронеровностей, приводит к возникновению ряда элементарных контактных электрических ячеек, соединенных параллельно (рис. 1, б). Включение такого дискретного контакта в электрическую цепь проявляется в виде суммарного действия всех ветвей схемы на ток во внешней по отношению к ней нагрузке  $R_0$ .

Используя известные модели контакта шероховатых поверхностей, можно показать, что общая емкость дискретного контакта

$$C_t = \sum_{i=1}^n C_{ti},$$

на контурной площади пятна фрикционного контакта, при упругих деформациях микронеровностей, оказывается столь малой, что пренебрежение ее шунтирующим действием общего сопротивления контакта в диапазоне информативных частот диагностирования вполне оправдано. Такое допущение позволяет представить эквивалентную схему замещения дискретного контакта упрощенно в виде термоэлектрического источника ЭДС  $E_t$  с общим сопротивлением  $R_t$  (рис. 1, в) [2]:

$$R_t = \left[ \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{r_{ti}} \right) \right]^{-1}, E_t = \sum_{i=1}^n e_{ti} g_{ti} / \sum_{i=1}^n g_{ti}, r_{ti} = 1/g_{ti}, (1)$$

где  $r_{ti}$ ,  $g_{ti}$ ,  $e_{ti}$  — соответственно сопротивление, проводимость и термоЭДС областей стягивания с общим числом  $n$ .

В условиях жидкостной смазки преобладающей является гальвано-ЭДС  $e_g$ , которая генерируется элементарными гальваническими парами, образованными участками металлических поверхностей разделенных слоем смазочного материала. Усредняя неоднородность свойств смазочного материала по толщине смазочного слоя, схему замещения элементарной контактной ячейки можно представить в виде параллельно включенных резистора  $r_g$  и конденсатора  $C_g$  (рис. 2, а) [2].

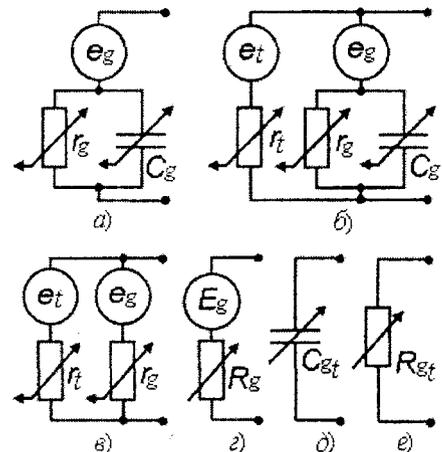


Рис. 2. Схема замещения для режима жидкостной (а), полужидкостной смазки (б) и обобщенные (в), (г), (д), (е)

В условиях полужидкостной смазки возникают кратковременные местные разрушения смазочной пленки. Поэтому для разных участков рабочих поверхностей, одновременно могут наблюдаться различные условия их взаимодействия, изменяющиеся от режима сухого трения до жидкостной смазки. Это указывает на возможность получения эквивалентной электрической схемы для полужидкостной смазки путем объединения ранее рассмотренных схем (рис. 2, б), которую с учетом ранее отмеченных допущений можно свести к упрощенной схеме (рис. 2, в) [2, 3]. Однако учет в этой и других схемах только активных сопротивлений практически исключает возможность рассмотрения динамических эффектов, которые проявляются при перезарядке электрических емкостей происходящих в реальных условиях работы трибосопряжения.

В ряде случаев используют еще более упрощенные схемы замещения элементарных контактных ячеек. Например, часто пренебрегают для не доминирующего режима смазки ЭДС одного из генераторов ( $e_t$ ,  $e_g$ ) или при некоторых условиях обеими. Аналогичные замечания касаются и сопротивлений ( $r_t$ ,  $r_g$ ) контактных ячеек. Возможны и другие сочетания рассмотренных допущений, которые в основном определяются режимом работы трибосопряжения и условиями его диагностирования [4]. Принимают также, при относительно малых изменениях толщины смазочной пленки или площади пятна контакта, линейность вольтамперной характеристики зоны трения. Отмеченные случаи схем замещения с учетом дискретности контакта представлены на рис. 2, г, д, е [5, 6, 7] и далеко не исчерпывают всего известного многообразия подходов их представления [8].

Наиболее часто встречается использование последней из упрощенных схем замещения (рис. 2, е), которая, является одним из предельных случаев упрощения [3, 5, 6]. Здесь резистор  $R_{gl}$  характеризует общее сопротивление многоточечного контакта, вызванное суммарным действием сопротивлений соответствующих тому или иному режиму трения. Однако такая одноэлементная схема замещения не позволяет учесть ряд ранее отмеченных факторов, которые могут при определенных условиях оказывать существенное влияние на результаты диагностирования. Поэтому на нее, видимо, целесообразно опираться на начальных этапах разработки средств диагностирования, либо при разработке устройств, предназначенных для выполнения оценочных исследований. Обычно на такой схеме замещения базируется работа средств диагностирования ранних выпусков обычно используемых при качественной оценке технического состояния диагностируемого трибосопряжения.

Целесообразность уменьшения числа элементов схемы замещения является очевидной, т.к. приводит к облегчению анализа режима ее работы, а также упрощает разработку принципов выделения измерительной информации и построение средств диагностирования. Между тем такой подход оправдан только в ситуациях, гарантирующих правильность трактовки получаемой диагностической информации. Это достигается применением в процессе диагностирования, помимо электропараметрических, например, методов, базирующихся на получении дополнительной измерительной информации по каналам иной физической природы. Другой подход заключается в совместном использовании, например, генераторных и электропараметрических методов. Каждый из названных подходов имеет свои преимущества и недостатки.

Реализация электропараметрических методов возможна при использовании для питания трибосопряжения внешнего по отношению к нему источника напряжения или источника тока. Представляя источник тока эквивалентным ему источником напряжения, две указанные схемы замещения источников энергии можно свести к рассмотрению одной схемы с различными параметрами ее элементов.

Во время работы трибосопряжения характер взаимодействия рабочих поверхностей непрерывно изменяется, что приводит к изменению его внутренней проводимости (сопротивления) и генерируемой ЭДС. Включение такого трибосопряжения в электрическую цепь совместно с источником энергии и нагрузкой вызывает изменение протекающего в цепи тока и падение напряжения на нагрузке, измеряя параметры которых судят о техническом состоянии функционирующего трибосопряжения [1, 9, 10].

Измерение напряжения при диагностировании традиционно осуществляется в схеме содержащей источник энергии, нагруженный на параллельно соединенные трибосопряжение и измеритель напряжения (рис. 3, а). Мгновенное значение напряжения определяется выражением:

$$u_{об} = (E \cdot G \pm e_o \cdot g_o) / (G + g_o + G_{пр}). \quad (2)$$

В выражении (2) приняты следующие условные обозначения:  $G = R^{-1} = (r_{вн} + R_d)^{-1}$  – проводимость, зависящая от внутреннего сопротивления  $r_{вн}$  источника энергии  $E$  и сопротивления добавочного резистора  $R_d$ ;  $G_{пр} = R_{пр}^{-1} = (R_{и} + r_{пр})^{-1}$  – активная проводимость измерителя напряжения с внутренним сопротивлением  $R_{и}$  и соединительных проводников  $r_{пр}$  в частотном диапазоне, позволяющем пренебречь влиянием реактивных составляющих указанных сопротивлений;  $e_o$ ,  $r_o = g_o^{-1}$  – соответственно, суммарное обобщенное мгновенное значение ЭДС, генерируемой трибосопряжением, и его внутреннее сопротивление, вызванные различными физическими явлениями происходящими в зоне трения.

Обычно при измерении напряжения стремятся выполнить условие

$$G_{пр} \ll G, g_o, \quad (3)$$

позволяющее минимизировать погрешности и привести выражение (2) к виду:

$$u_{об} = (E \cdot G \pm e_o \cdot g_o) / (G + g_o). \quad (4)$$

Измерение тока при диагностировании обычно выполняется по схеме отличающейся от приведенной (рис. 3, а) последовательным включением в цепь с источником энергии и трибосопряжением измерителя тока (рис. 3, б). Мгновенное значение тока с учетом ранее введенных обозначений определяется выражением:

$$i = \frac{(E m e_o) \cdot G \cdot G_{ра} \cdot g_o}{G_{ра} \cdot g_o + G_{ра} \cdot G + G \cdot g_o}, \quad (5)$$

где  $G_{ра} = R_{ра}^{-1} = (r_{пр} + R_a)^{-1}$  – активная проводимость измерителя тока с внутренним сопротивлением  $R_a$  и сопротивлением соединительных проводников  $r_{пр}$ .

Считая, что при диагностировании всегда обеспечивается выполнение условий

$$r_{пр} \ll R_a, R_{ра} \ll R, \quad (6)$$

выражение (5) можно привести к виду:

$$i = (E m e_o) \cdot G \cdot g_o / (G + g_o). \quad (7)$$

Наличие в числителе выражений (4) и (7) знака плюс-минус объясняется сложным флуктуационным характером генерируемой ЭДС, мгновенное значение которой определяется случайным сочетанием ее постоянной и переменной составляющей. Можно, например, заметить, что если в числителе выражения (4) знак минус, то при выполнении условия  $E \cdot G \approx e_o \cdot g_o$  измеряемое напряжение близко к нулю. Из этого факта в случае использования при анализе результатов диагностирования одноэлементной схемы замещения трибосопряжения (рис. 2, д), можно сделать вывод, о том, что трибосопряжение работает практически в режиме сухого трения. В действительности такая ситуация может быть обусловлена в том числе знаками и соотноше-

нием постоянной и переменной составляющей генерируемой ЭДС. При этом трибосопряжение фактически возможно работает в режиме жидкостной смазки. Аналогичные замечания можно сделать и по поводу измерения тока согласно выражению (7). Указанные обстоятельства, очевидно, оказывают существенное влияние на определение параметров схемы замещения и, как следствие, на правильность интерпретирования результатов диагностирования.

Формулы (4) и (7) свидетельствуют о зависимости измеряемого напряжения и тока одновременно и от ЭДС, генерируемой трибосопряжением, и от его внутреннего сопротивления

$$u_{ab} = f(g_o, e_o), i = f(g_o, e_o), \quad (8)$$

что указывает на неоднозначность результатов диагностирования. Это обстоятельство препятствует определению параметров схемы замещения трибосопряжения, которые в конечном итоге характеризуют контакт его взаимодействующих поверхностей.

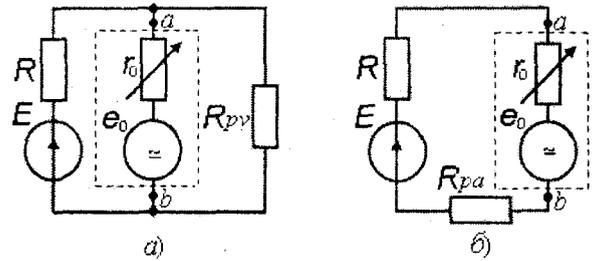


Рис. 3. Традиционные схемы для определения параметров трибосопряжения при измерении напряжения (а) и тока (б)

Сочетание различных условий и соотношений параметров, входящих в выражения (4) и (7) позволяет рассмотреть реально возникающие ситуации при  $G, E = const$ , соответствующие различным режимам взаимодействия рабочих поверхностей при функциональном диагностировании трибосопряжений с учетом ранее сделанных замечаний (расчётные формулы приведены в таблице 1).

Таблица 1 – Информативность измеряемых параметров

Номер	Условие	Параметр	Характеристика	Схема
1	$G \gg g_o$	$u_{ab} = E \pm (g_o/G) \cdot e_o$	$u_{ab} = f(g_o, e_o)$	рис. 3, а
2	$e_o \cdot g_o \ll E \cdot G$	$u_{ab} = E \cdot G / (G + g_o)$	$u_{ab} = f(g_o)$	рис. 3, а
3	$e_o \cdot g_o \gg E \cdot G$	$u_{ab} = \pm e_o \cdot g_o / (G + g_o)$	$u_{ab} = f(g_o, e_o)$	рис. 3, а
4	$G \gg g_o, (g_o/G) \cdot e_o \ll E$	$u_{ab} = E$	$u_{ab} = const$	рис. 3, а
5	$G \gg g_o, (g_o/G) \cdot e_o \gg E$	$u_{ab} = \pm (g_o/G) \cdot e_o$	$u_{ab} = f(g_o, e_o)$	рис. 3, а
6	$G \ll g_o$	$u_{ab} = (G/g_o) \cdot E \pm e_o$	$u_{ab} = f(g_o, e_o)$	рис. 3, а
7	$G \ll g_o, (G/g_o) \cdot E \ll e_o$	$u_{ab} = \pm e_o$	$u_{ab} = f(e_o)$	рис. 3, а
8	$G \ll g_o, (G/g_o) \cdot E \gg e_o$	$u_{ab} = (G/g_o) \cdot E$	$u_{ab} = f(g_o)$	рис. 3, а
9	$G \gg g_o$	$i_o = (E m e_o) \cdot g_o$	$i_o = f(g_o, e_o)$	рис. 3, б
10	$e_o \ll E$	$i_o = E \cdot g_o \cdot G / (G + g_o)$	$i_o = f(g_o)$	рис. 3, б
11	$e_o \gg E$	$i_o = m e_o \cdot g_o \cdot G / (G + g_o)$	$i_o = f(g_o, e_o)$	рис. 3, б
12	$G \gg g_o, e_o \ll E$	$i_o = E \cdot g_o$	$i_o = f(g_o)$	рис. 3, б
13	$G \gg g_o, e_o \gg E$	$i_o = m e_o \cdot g_o$	$i_o = f(g_o, e_o)$	рис. 3, б
14	$G \ll g_o$	$i_o = (E m e_o) \cdot G$	$i_o = f(e_o)$	рис. 3, б
15	$G \ll g_o, e_o \ll E$	$i_o = E \cdot G$	$i_o = const$	рис. 3, б
16	$G \ll g_o, e_o \gg E$	$i_o = m e_o \cdot G$	$i_o = f(e_o)$	рис. 3, б

Представленные в таблице 1 соотношения показывают, что источник энергии при одних условиях можно считать генератором напряжения, а в других случаях генератором тока. Трибосопряжение может работать также в режимах, создающих такие условия работы цепи, когда источник энергии не является близким по своим параметрам ни к идеальному источнику тока, ни к идеальному источнику напряжения, а его характеристики занимают некоторое промежуточное положение по отношению к характеристикам указанных источников. Такое разнообразие ситуаций, через которые в процессе диагностирования могут проходить характеристики источника энергии, оказывает непосредственное

влияние не только на достоверность, т.е. правильность интерпретирования результатов диагностирования, но и в значительной степени определяет целесообразность и возможность измерения тех или иных информативных параметров.

Рассмотренные ситуации показывают зависимость измеряемых диагностических параметров не только от режима работы источника энергии, но в еще большей степени от соотношения значений членов входящих в выражения, определяющие эти параметры. В одних условиях, для получения однозначной зависимости, оказывается целесообразнее измерять напряжение, например в ситуации 2, в других – ток, как следует из ситуации 12.

В некоторых случаях (ситуации 4 и 15) получение диагностической информации невозможно из-за независимости измеряемого параметра от параметров схемы замещения трибосопряжения. Другая группа ситуаций (случаи 7 и 16) позволяет сделать вывод о неэффективности использования параметрических методов измерения, что в данном примере, прежде всего, объясняется выбором соотношения значений источника энергии и генерируемой трибосопряжением ЭДС. Приведенный пример указывает на один из критериев выбора величины ЭДС источника энергии, и на важность ее обоснованного выбора.

Ряд ситуаций, представленный в таблице 1 (случаи 1, 3, 5, 6, 9, 11, 13) характеризует неоднозначность получаемых результатов диагностирования. Для большинства из них варьирование параметров, с целью получения однозначных зависимостей, малоэффективно. Исключения составляют ситуации 6 и 9, когда, допуская незначительные погрешности на основании априорной информации можно, в случае относительной малости, пренебречь ЭДС генерируемой трибосопряжением.

### Выводы

Неоднозначная зависимость результатов диагностирования от параметров схемы замещения трибосопряжения в большинстве случаев затрудняет интерпретацию полученных результатов, снижает достоверность. В некоторых стационарных режимах работы трибосопряжений достаточно просто обеспечить такие условия, при которых можно достичь с требуемой точностью высокого соответствия результатов измерения напряжения или тока и параметров схемы замещения. Прежде всего, это касается работы источника энергии в режиме генератора напряжения или близком к такому режиму. В этом случае наблюдается однозначная линейная зависимость измеряемого тока от проводимости, по которой, и судят о состоянии трибосопряжения (случай 12).

Уменьшению влияния на результат измерения диагностических параметров, оказываемого ЭДС, генерируемой трибосопряжением, требует существенного увеличения напряжения источника. Реализации такого условия препятствуют факторы, связанные с напряжением пробоя смазочной пленки разделяющей контактирующие поверхности в режиме жидкостной смазки. Выбор напряжения источника для трибосопряжения, работающего большую часть времени в режиме сухого трения, связан с учетом возможности локального разогрева зоны трения. При значительной ее проводимости происходит оплавление вершин микронеровностей рабочих поверхностей, что в свою очередь негативно сказывается на результатах диагностирования и на дальнейшей эксплуатации трибосопряжения.

Работа источника энергии в режиме, близком к генератору тока, сопряжена с рядом еще более существенных проблем. Здесь при работе трибосопряжения в условиях жидкостной смазки довольно сложно обеспечить в динамическом режиме значительное внутреннее сопротивление источника. Кроме того, из-за высокого удельного сопротивления смазочного материала даже незначительный

ток, генерируемый источником, приводит к такому падению напряжения на указанном сопротивлении, что вероятность пробоя пленки смазочного материала существенно возрастает. Работа трибосопряжения в режиме сухого трения приводит к генерации ЭДС, уровень которой может существенно превышать падение напряжения, вызванное источником тока на элементах схемы. В подобной ситуации является очевидным то, что более целесообразно использование других методов диагностирования трибосопряжений, например электрошумовых [4].

Наибольшие трудности при диагностировании появляются при работе трибосопряжения в режимах, не позволяющих считать источник энергии генератором тока или генератором напряжения, что приводит к неоднозначности результатов диагностирования. Очевидно, здесь методы диагностирования, основанные на использовании традиционных подходов и схем (рис. 3), малоэффективны. Это диктует необходимость разработки более совершенных методов и схем средств диагностирования.

### Литература:

- 1 Постников С.Н. *Электрические явления при трении и резании*. – Горький, 1975. – 280 с.
- 2 Мельниченко И.М. *Анализ, расчет и применение эквивалентных электрических схем фрикционного контакта // Вопросы электрофизики трения и обработки резанием*. – Тр. ГПИ им. А.А. Жданова. – Горький, 1970. – Т. 26. – №4. – С. 33-43.
- 3 Подмастерьев К.В. *Электропараметрические методы комплексного диагностирования опор качения*. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 376 с.
- 4 Корндорф С.Ф. *Возможность применения шумовой термометрии для определения температуры смазочной пленки / С.Ф. Корндорф, Н.В. Чекашова // Известия ОрелГТУ. – Сер. Машиностроение. Приборостроение. Орел: ОрелГТУ, 2005. – №1. – С. 46-48.*
- 5 Камерон А. *Теория смазки в инженерном деле / Пер. с англ. В.А. Бородина; Под ред. В.К. Житомирского*. – М.: Мир, 1962. – С. 92-94.
- 6 Малыгин В.М. *Электрический контроль режимов трения в шарикоподшипниках // Вестник машиностроения*. – 1980. – №11, – С. 28-29.
- 7 Захаров М.Г. *Метод и прибор для оценки толщины смазочной пленки в подшипниках качения // Повышение технического уровня и эффективности производства приборов для научных целей. Труды ОФ МИП. – Орел, 1988. – С. 35-41.*
- 8 Остраков А.А. *Электрофизические процессы при трении и смазочном действии / А.А. Остраков, Л.И. Бершадский // Проблемы трения и изнашивания*. – Киев, 1978. – Вып. 13. – С. 12-17.
- 9 Хольм Р. *Электрические контакты*. – М.: Иностранная литература, 1961. – 464 с.
- 10 Корндорф С.Ф. *Оценка работоспособности неразборного подшипника качения по флуктуациям его электрического сопротивления / С.Ф. Корндорф, К.В. Подмастерьев // Современные физические методы неразрушающего контроля: Докл. / Науч. тех. семинар. – М.: МДНТП им. Ф.Э. Дзержинского, 1984. – С. 143-146.*

## ЭЛЕМЕНТЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ

УДК 681.511.4

Канд. техн. наук Косчинский С.Л., асп. Ретинский С.Н.  
(Орловский государственный технический университет)  
Россия, г. Орел, тел. (4862)419879; E-mail: kipra@mail.ostu.ru

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ИМПУЛЬСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ С АНАЛОГОВЫМ И НЕЧЕТКИМ ПИД-РЕГУЛЯТОРАМИ

*The theoretical simulations and experimental modeling of the boost DC-DC converter dynamics with conventional and fuzzy PID control is presented in this paper.*

#### Введение

В настоящее время широкое использование аналоговых регуляторов различных типов (ПИ-, ПИД- и др.) для управления импульсными преобразователями с ШИМ обусловлено их эффективностью, простотой реализации и отработанной методикой синтеза [1]. Однако наличие определенного диапазона изменения внутренних и внешних параметров объекта управления накладывает ограничение на быстродействие аналоговых регуляторов, связанное с необходимостью гарантировать устойчивость преобразовательной системы (ПС). В то же время, использование аппроксимирующих свойств нечетких регуляторов [2-5] зачастую позволяет получить адаптивный регулятор для импульсной ПС, наилучшим образом соответствующий требованиям, предъявляемым к системе в условиях изменения ее параметров.

Целью данной работы является оценка адекватности подхода к математическому моделированию импульсных ПС с адаптивными регуляторами на основе нечеткой логики, а также оценка эффективности использования фаззи-регуляторов в указанных системах путем сопоставления экспериментальных и теоретических результатов исследования динамики импульсного повышающего преобразователя постоянного напряжения (ПППН).

#### Описание объекта управления

Схема замещения исследуемого импульсного ПППН приведена на рис. 1.

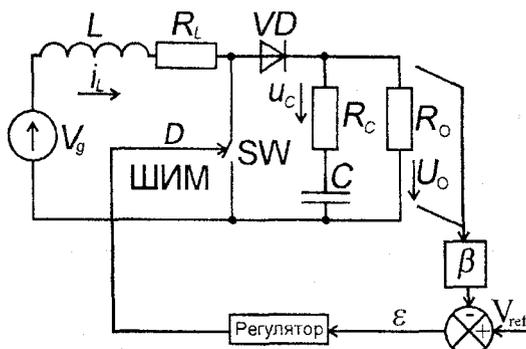


Рис. 1. Схема замещения импульсного ПППН

На основе схемы замещения, представленной на рис. 1, получена математическая модель в виде разрывной динамической системы с внешним периодическим воздействием [3, 6]:

$$\frac{dX}{dt} = A(K_F) \cdot X + B, \quad (1)$$

$$A(K_F) = \begin{bmatrix} \frac{R_L}{L} & \frac{R_O \cdot R_C \cdot (1 - K_F)}{(R_O + R_C) \cdot L} & \frac{R_O \cdot (1 - K_F)}{(R_O + R_C) \cdot L} \\ \frac{R_O \cdot (1 - K_F)}{(R_O + R_C) \cdot C} & & \frac{1}{(R_O + R_C) \cdot C} \end{bmatrix},$$

$$X = \begin{bmatrix} i_L \\ u_C \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} V_g / L \\ 0 \end{bmatrix},$$

где  $K_F$  – импульсная функция, характеризующая состояние ключевого элемента SW на  $k$ -том периоде регулирования.

Значение функции  $K_F$  вычисляется по алгоритму:

$$K_F = \begin{cases} 1, & k \cdot T_S \leq t < t_k, \\ 0, & t_k \leq t < (k+1) \cdot T_S. \end{cases} \quad (2)$$

где  $T_S$  – период ШИМ;

$t_k$  – момент смены состояния ключевого элемента SW (момент коммутации) на  $k$ -том периоде регулирования.

При этом  $K_F = 1$  соответствует проводящее состояние ключевого элемента SW и непроводящее состояние диода VD, а  $K_F = 0$  – непроводящее состояние ключевого элемента SW и проводящее состояние диода VD.

При проведении моделирования и экспериментальных исследований использовались следующие значения параметров силовой части преобразователя (рис. 1): диапазон входного напряжения  $V_g = 20...60$  В, диапазон сопротивления нагрузки  $R_O = 100...1000$  Ом,  $R_L = 0,74$  Ом,  $R_C = 0,18$  Ом,  $L = 2,12$  мГн,  $C = 100$  мкФ,  $T = 40$  мкс. Для приведенных параметров импульсного повышающего преобразователя по методике синтеза из [6] для  $V_{g \text{ ном}} = 45$  В получены следующие параметры аналогового ПИД-регулятора

(рис. 2, 3):  $\omega_1 = 100$  рад/с,  $\omega_2 = 1300$  рад/с,  $\omega_p = 40000$  рад/с,  $G_{cm} = 0,5$ ,  $U_r = 1$  В – амплитуда пилообразного

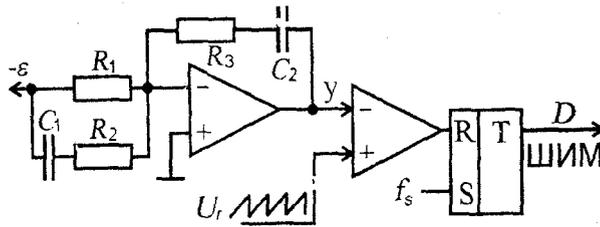


Рис. 2. Схема замещения аналогового ПИД-регулятора

Нечеткий ПИД-регулятор (рис. 4) представляет собой двухканальную структуру [2], в каждом из каналов которого имеется нечеткая система с двумя входными величинами  $\varepsilon$  – ошибкой регулирования и  $\Delta\varepsilon$  – оценкой скорости изменения ошибки регулирования и одной выходной величиной. При этом выходная величина ПД-звена непосредственно участвует в формировании относительной длительности проводящего состояния ключа  $d$ , а выходная величина ПИ-звена формирует приращение  $\Delta d$ .



Рис. 4. Структура нечеткого ПИД-регулятора

Синтез нечеткого ПИД-регулятора производился на основе параметров аналогового прототипа (рис. 2) [2]. Полученные в результате синтеза таблицы фазификации входных величин и таблицы правил нечетких регуляторов в каждом звене были модифицированы для обеспечения адаптивных свойств нечеткого ПИД-регулятора [3].

Таблица 1 – Правила для входных величин  $\varepsilon$  и  $\Delta\varepsilon$

$\varepsilon, \Delta\varepsilon$	NB	NS	ZE	PS	PB
	-1	-0,33	0	0,33	1

Таблица 2 – Правила формирования величин для ПД

		$\Delta\varepsilon$				
		NB	NS	ZE	PS	PB
$\varepsilon$	NB	-1	-0,67	-0,33	0	0,33
	NS	-1	-0,67	-0,33	0	0,33
	ZE	-0,67	-0,33	0	0,33	0,67
	PS	-0,33	0	0,33	0,67	1
	PB	-0,33	0	0,33	0,67	1

Таблица 3 – Правила формирования величин для ПИ

		$\Delta\varepsilon$				
		NB	NS	ZE	PS	PB
$\varepsilon$	NB	-1	-0,67	-0,67	-0,33	-0,33
	NS	-0,67	-0,67	-0,33	-0,33	0
	ZE	0	0	0	0	0
	PS	0	0,33	0,33	0,67	0,67
	PB	0,33	0,33	0,67	0,67	1

напряжения,  $f_s = 25$  кГц – частота ШИМ, где  $\omega_L = 1/(R_3 \cdot C_2)$ ,  $\omega_2 = 1/((R_1 + R_2) \cdot C_1)$ ,  $\omega_p = 1/(R_2 \cdot C_1)$ ,  $G_{cm} = R_3/R_1$ .

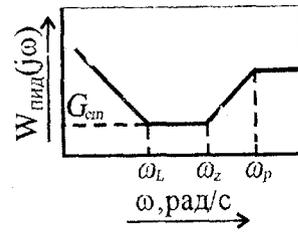


Рис. 3. Передаточная характеристика линейной части аналогового ПИД-регулятора

Модифицированные правила для входных величин  $\varepsilon$  и  $\Delta\varepsilon$  приведены в таблице 1, а правила формирования выходных величин для ПД и ПИ звеньев приведены в таблицах 2 и 3 соответственно.

**Анализ динамики преобразователя**

Сравнительный анализ динамики импульсного повышающего преобразователя постоянного напряжения проводился для двух вариантов реализации ПИД-регулятора – аналогового и адаптивного на основе нечеткой логики. Для каждого из вариантов проводилось как математическое моделирование, так и экспериментальные исследования переходных процессов запуска преобразователя и отработки скачка нагрузки. При этом в качестве показателей качества переходных процессов рассматривались длительность переходного процесса по установлению с точностью 1% и относительное перерегулирование, нормированное к установившемуся значению регулируемой величины.

Математическое моделирование объекта управления (1) производилось в виде решения задачи Коши для начальных условий  $X_k(t)$  на интервале  $k \cdot T_S \leq t < (k+1) \cdot T_S$ , общая форма которого может быть представлена в виде отображения сдвига:

$$X_{k+1} = C_k(D_k) \cdot X_k + V_k(D_k), \quad (3)$$

где  $C_k = C^{(0)} \cdot C^{(1)}$ ,  $V_k = C^{(0)} \cdot V^{(1)} + V^{(0)}$ ;

$$C^{(1)}(D_k) = e^{A^{(1)} \cdot T_S \cdot D_k};$$

$$C^{(0)}(D_k) = e^{A^{(0)} \cdot T_S \cdot (1 - D_k)};$$

$$V^{(1)}(D_k) = -[E - e^{A^{(1)} \cdot T_S \cdot D_k}] \cdot A^{(1)-1} \cdot B;$$

$$V^{(0)}(D_k) = -[E - e^{A^{(0)} \cdot T_S \cdot (1 - D_k)}] \cdot A^{(0)-1} \cdot B.$$

Здесь  $D_k = t_k / T_S - k$  – относительная длительность проводящего состояния ключа SW (рис. 1);  $D_k$  ограничено диапазоном  $0 \leq D_k \leq 0,9$ , исходя из особенности работы повышающего преобразователя постоянного напряжения [6].

При исследовании динамики преобразователя были получены данные о величине перерегулирования  $\sigma$  (рис. 5) и длительности  $t$  переходного процесса (рис. 6) для процесса запуска при сопротивлении нагрузки  $R_0 = 400$  Ом и различных значениях входного напряжения в диапазоне от 20 до 60 В.

На рис. 5 и 6 цифрами обозначены зависимости для аналогового (1) и для нечеткого (2) регулятора, причем сплошной линией здесь и далее обозначены данные математического моделирования, а пунктирной линией – экспериментальные данные.

На основе анализа полученных данных установлено, что для обоих регуляторов наблюдается существенное расхождение теоретических и экспериментальных результатов для величины перерегулирования при переходном процессе запуска преобразователя. При этом максимальное расхождение для аналогового ПИД-регулятора составляет 137% (при входном напряжении 60 В), а для нечеткого ПИД-регулятора максимальное расхождение составляет

46% (при входном напряжении 45 В). Отмеченное расхождение экспериментальных и теоретических результатов для процесса запуска преобразователя в обоих случаях обусловлено наличием броска входного тока, насыщающего дроссель преобразователя (рис. 7). Амплитуда броска тока дросселя в начальный момент запуска на два порядка превышает его установившееся значение (см. осциллограммы 4 на рис. 8, 9). В тоже время, несмотря на расхождение результатов моделирования и эксперимента, нечеткий ПИД-регулятор в обоих случаях демонстрирует предпочтительные показатели качества переходного процесса запуска преобразователя по сравнению с аналоговым прототипом.

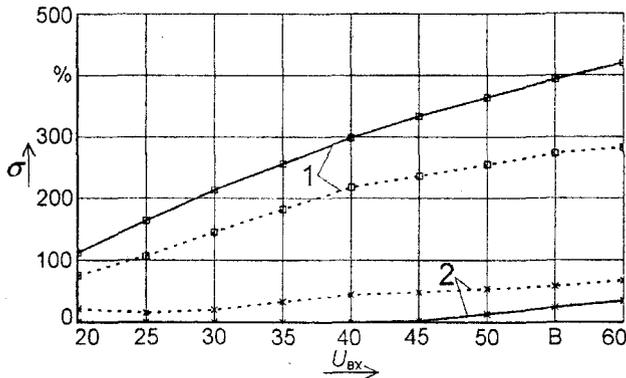


Рис. 5. Величина перерегулирования  $\sigma$  переходного процесса запуска

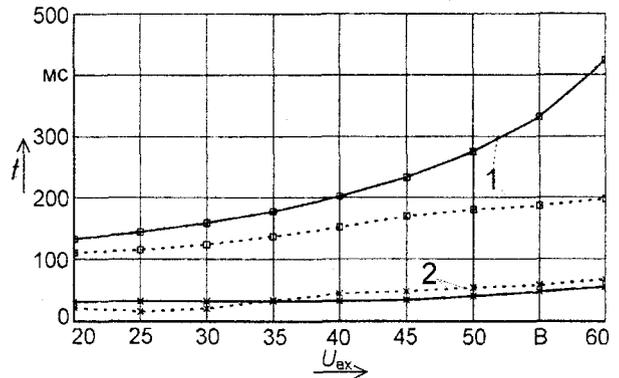


Рис. 6. Длительность  $t$  переходного процесса запуска преобразователя

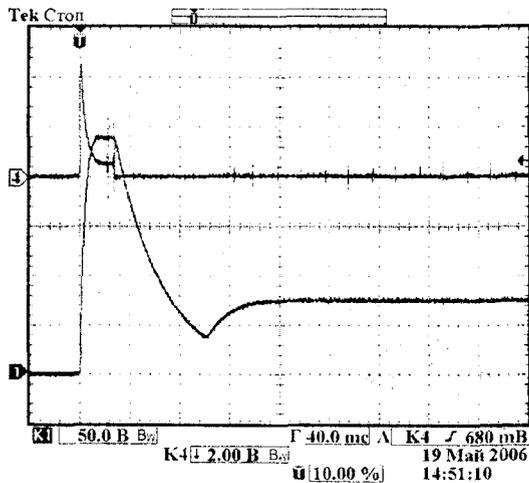


Рис. 7. Переходный процесс запуска преобразователя с аналоговым ПИД-регулятором ( $V_g = 45 \text{ В}$ ,  $R_O = 400 \text{ Ом}$ )

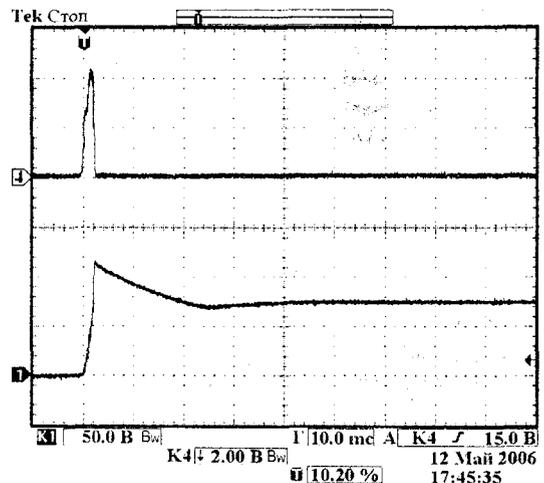


Рис. 8. Переходный процесс запуска преобразователя с нечетким ПИД-регулятором ( $V_g = 45 \text{ В}$ ,  $R_O = 400 \text{ Ом}$ )

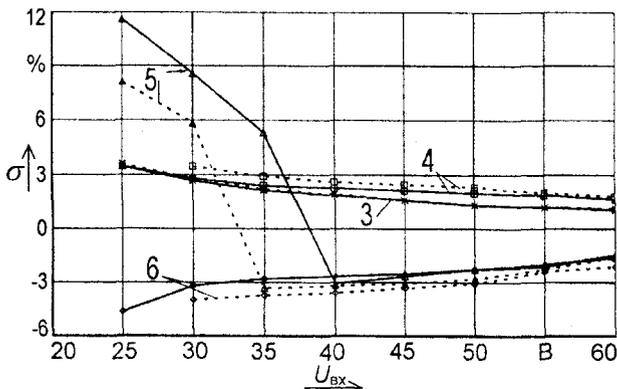


Рис. 9. Величина перерегулирования  $\sigma$  для переходного процесса изменения нагрузки

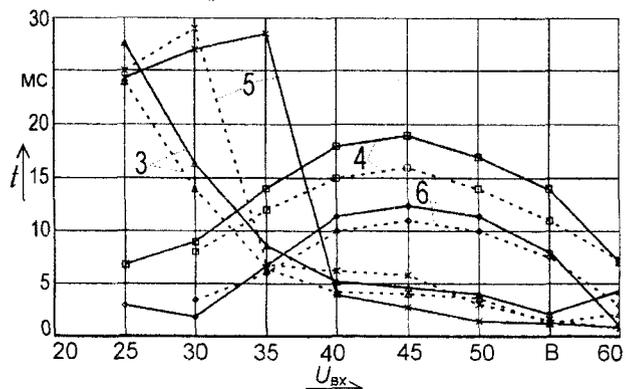


Рис. 10. Длительность  $t$  переходного процесса изменения нагрузки

При исследовании переходного процесса скачкообразного изменения сопротивления нагрузки импульсного повышающего преобразователя постоянного напряжения получены данные о величине перерегулирования  $\sigma$  и длительности  $t$  переходного процесса, на основе которых построены зависимости, приведенные на рис. 9 и 10 соответственно. Здесь зависимости 3 и 5 построены для аналогового регулятора, а зависимости 4 и 6 – для нечеткого. Причем зависимости 3 и 4 на рис. 9 и 10 соответствуют скачку сопротивления нагрузки от 100 Ом до 1 кОм, а зависимости 5 и 6 соответствуют скачку сопротивления нагрузки от 1 кОм до 100 Ом.

На основе сопоставления теоретических и экспериментальных зависимостей (рис. 9, 10) для показателей качества переходного процесса скачкообразного изменения сопротивления нагрузки установлено, что для обоих ПИД-регуляторов данные, полученные в результате математического моделирования, адекватны экспериментальным данным. Имеющееся расхождение теоретических и экспериментальных данных для аналогового ПИД-регулятора при входном напряжении  $V_k = 35$  В (теоретическая зависимость 5, рис. 9, 10 смещена вправо относительно экспериментальной) отмечается на границе колебательного и апериодического типов переходных процессов. При этом переход от колебательного переходного процесса к апериодическому для зависимости, полученной в результате математического моделирования, происходит при большем значении входного напряжения. Это обусловлено наличием погрешности, связанной с определением диссипативных параметров ключевых элементов преобразовательной системы. В целом, из рассмотрения диаграмм рис. 9, 10 следует, что для нечеткого ПИД-регулятора показатели качества переходных процессов слабо зависят от параметров объекта управления и незначительно отличаются от результатов для аналогового ПИД-регулятора. Исключение составляет ситуация наброса нагрузки при низком значении входного напряжения преобразователя. В этом случае нечеткий ПИД-регулятор обеспечивает лучшие показатели качества переходного процесса.

#### Заключение

В результате проведенного математического моделирования и экспериментальных исследований импульсного повышающего преобразователя постоянного напряжения с аналоговым и нечетким ПИД-регуляторами установлено, что для переходного процесса запуска в условиях качественного изменения параметров преобразовательной системы (изменения индуктивности дросселя  $L$  (рис. 1) вследствие его насыщения) математическая модель (1) имеет ограниченную адекватность. В тоже время установлено, что для переходного процесса изменения сопротивления нагрузки теоретические результаты соответствуют экспериментальным данным. На основании этого можно утверждать об адекватности используемой математической модели преобразовательной системы, по крайней мере, для «рабочих» режимов ее функционирования.

В результате сравнения динамики аналогового и нечеткого ПИД-регуляторов установлено, что в условиях незначительного изменения выходного напряжения (переходный процесс изменения сопротивления нагрузки) в области высоких входных напряжений по показателям качества переходного процесса аналоговый ПИД-регулятор имеет незначительное преимущество над нечетким. В то же время в области низких входных напряжений  $U_{вх}$  наблюдается обратная ситуация. В данном случае нечеткий регулятор демонстрирует лучшие показатели качества переходного процесса по сравнению с аналоговым регулятором. Полученные результаты обусловлены тем, что эффективность нечеткого регулятора зависит от диапазона и дискретности фазификации регулируемой величины. В данном случае диапазон изменения регулируемой величины незначителен, и в процессе фазификации используются только два правила, что в динамических режимах не позволяет нечеткому регулятору обеспечить значительное преимущество над аналоговым. В то же время в случае значительного изменения выходного напряжения (переходный процесс запуска) нечеткий ПИД-регулятор обеспечивает существенно лучшие показатели (обеспечивает 4-5 кратное преимущество), как по величине перерегулирования, так и по длительности переходного процесса.

#### Литература:

- 1 Методы классической и современной теории автоматического управления: учебник в 3-х т. – Т.2: Синтез регуляторов и теория оптимизации систем автоматического управления / Под ред. Н.Д. Егунова. – М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2000. – 736 с.
- 2 Kolokolov Yu. V. Comparative Study of the Dynamics and Overall Performance of Boost Converter with Conventional and Fuzzy Control in Application to PFC / V. Yu. Kolokolov, S.L. Koschinsky, A. Hamzaoui // Proceedings from IEEE «Power Electronics Specialist Conference (PESC'04)» – June 20-25, 2004, Aachen, Germany. – PP. 2165-2171.
- 3 Косчинский С.Л. Исследование динамики импульсных преобразовательных систем с адаптивными регуляторами на основе нечеткой логики / С.Л. Косчинский, С.Н. Ретинский, А.В. Романов // Техническая электродинамика, тематический выпуск «Силовая электроника и эффективность». – Киев, 2004. – Т. 3. – С. 3-6.
- 4 Chen Liu Comparison between a Fuzzy PID Controller and a Kind of Nonlinear PID Controller / Liu Chen, Xu Jian-Xin // Proceedings of the 36-th Conference on Decision & Control. – San Diego, California, December 1997. – PP. 2736-2741.
- 5 Viswanathan K. A Universal Fuzzy Controller for a Non-linear Power Electronic Converter / K. Viswanathan, D. Srinivasan, R. Oruganti // Proceedings from IEEE «Power Electronics Specialist Conference (PESC'04)» – June 20-25, 2004, Germany. PP. 46-51.
- 6 Севернс Р. Импульсные преобразователи постоянного напряжения для систем вторичного электропитания / Р. Севернс, Г. Блум: Пер. с англ.; под ред. Л. Е. Смольникова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 294 с.

УДК 658.012.011.56:687.12

Студ. Гладков А.П., ст. преп. Кваскова Т.В., канд. техн. наук, ст. преп. Тарапанов А.А.  
(Орловский государственный технический университет)  
Россия, г. Орел, тел. (4862)454998; E-mail: tarapanov@orel.ru

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СИНТЕЗ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ

*In the issue information maintenance and program of practical realization of the automated synthesis of the constructive decisions of the proof clothes are developed.*

Проектирование модели защитной одежды предполагает учет комплекса требований, определяющих уровень ее соответствия назначению, условиям эксплуатации и другим аспектам.

Посредством рациональной проработки конструктивных решения модели и оптимизации методов технологической обработки можно добиться максимальной безопасности человека и надлежащего уровня удобства. Рациональное конструктивное решение модели должно быть дополнено рациональным выбором материалов и формированием их в единую структуру пакета. Кроме того, при проектировании защитной одежды необходимо учитывать такие стандарты показателей, как информационная выразительность, рациональность формы, композиционная целостность, совершенство производственного исполнения и стабильность товарного вида [1]. Все это достигается путем тщательной проработки технологических элементов конструкции. При этом следует учитывать, что каждый отдельно взятый элемент конструкции будет представлять собой определенную ценность только в том случае, когда вся модель в целом будет отвечать комплексу предъявляемых к ней требований. Данную проблему конструирования защитной одежды можно решить с помощью известных в производственной практике методов поискового конструирования [2].

Для каждого технологического элемента существует несколько взаимозаменяемых, но различающихся по своим характеристикам вариантов.

Для выбора альтернативных вариантов узлов сложной конструкции формируется множество допустимых альтернатив [3]. Требования элементов конструкции по отношению друг к другу обычно заменяют дополнительными требованиями к выбираемым альтернативам, а выбор критериев и множество допустимых альтернатив рационально ограничивают, стремясь к снижению размерности решаемой задачи. Среди множества альтернатив обычно несколько бывают наиболее перспективными. Остальные часто бывают ложными. Поэтому каждый раз встает задача не только предложить несколько альтернативных улучшений традиционных решений, но, главное, найти наиболее рациональное из них.

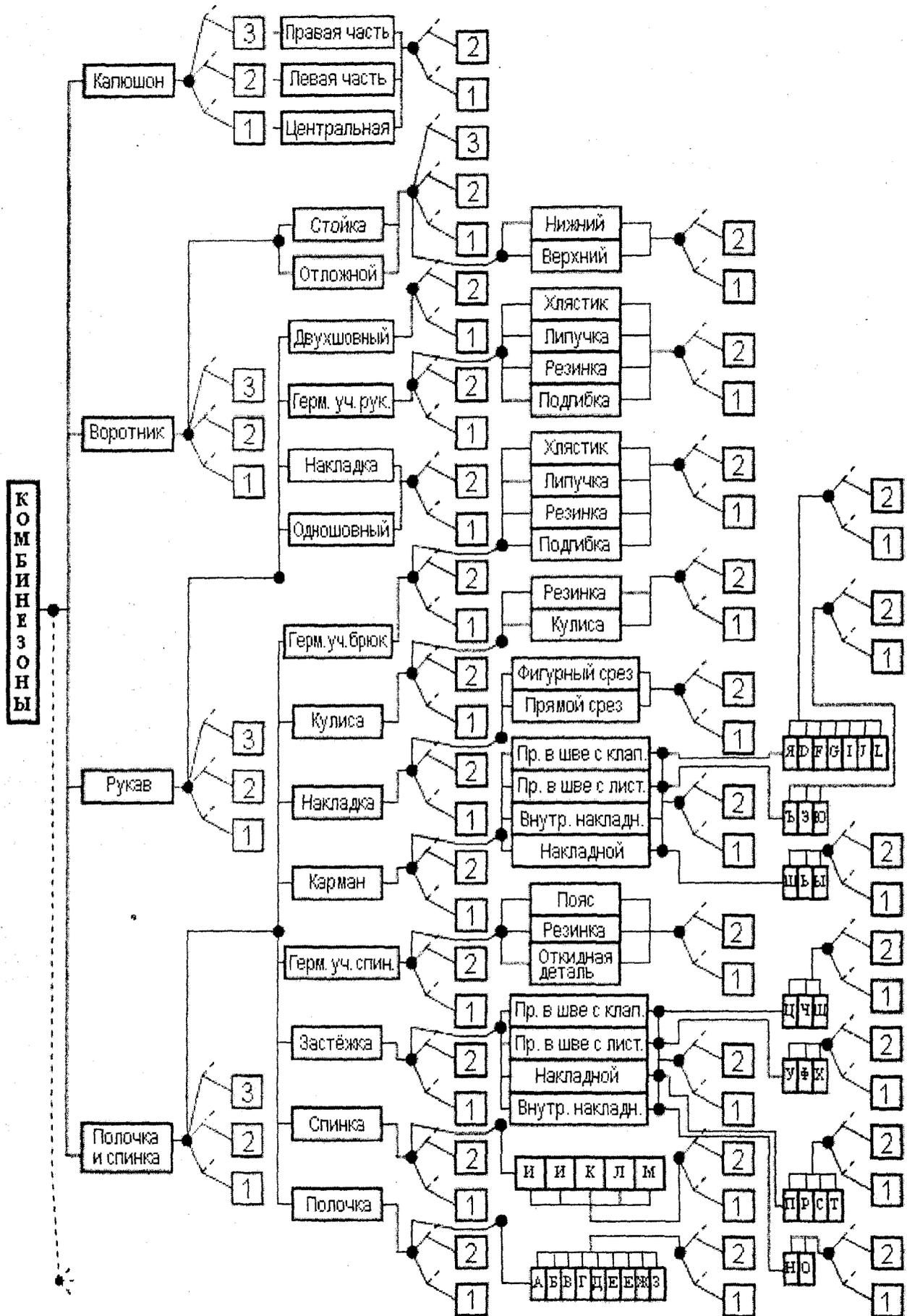
С математической точки зрения суть метода поискового конструирования (синтеза технических решений) заключается в том, что информация о

множестве всех решений, относящихся к модели в целом и ее функциональным элементам, представлена графически в форме древовидного графа с вершинами «И» и «ИЛИ». Данный древовидный граф называется «И/ИЛИ деревом» [2].

Альтернативные функциональные элементы отражены своими свойствами или признаками. Варируя конструктивные элементы и признаки, можно получить как известные, так и не известные (новые) конструктивные решения. Для автоматизированного синтеза рациональных и новых конструктивных решений необходимо представить по интересующему классу предлагаемой модели все наиболее интересные и существенно отличающиеся конструктивные решения в виде дерева конструктивных решений. Эта цель достигается построением И/ИЛИ дерева, которое, помимо вершин И, образующих различные структуры элементов, содержит вершины ИЛИ, объясняющие альтернативные элементы и признаки, характеризующие индивидуальные особенности каждого конструктивного решения [3] (рис. 1).

Технологические элементы, входящие в состав набора конструкции, представленной на рис. 1, обозначены буквами: А – Левая часть полочки, Б – Правая часть полочки, В – Левая часть кокетки, Г – Правая часть кокетки, Д – Левая нижняя часть полочки, Е – Правая нижняя часть полочки, Ё – Левая укороченная часть полочки, Ж – Правая укороченная часть полочки, З – Пояс, И – Левая часть спинки, Й – Правая часть спинки, К – Левая часть брюк, Л – Правая часть брюк, М – Спинка, Н – Пуговицы, О – Деталь подборта, П – Откосок, Р – Молния, С – Гульфик, Т – Планка, У – Обтачка, Ф – Откосок, Х – Молния, Ц – Обтачка, Ч – Откосок, Ш – Кнопки, Щ – Карман, Ъ – Верхний клапан, Ы – Нижний клапан, Ь – Листочка, Э – Мешковина, Ю – Молния, Я – Первая обтачка, Д – Вторая обтачка, Ф – Первая мешковина, Г – Вторая мешковина, I – Верхний клапан, J – Нижний клапан, L – Кнопки.

Исходное множество решений ограничивается перспективными и оригинальными элементами, обладающими наиболее высокими показателями [4]. В дальнейшем расширение множества может осуществляться не только по решениям, относящимся к модели в целом, но и по отдельным ее функциональным элементам, с использованием информации из различных источников.



1 – цветовое решение, 2 – варианты кроя, 3 – варианты ткани

Рис. 1. И/ИЛИ дерево вариантов модели защитной одежды

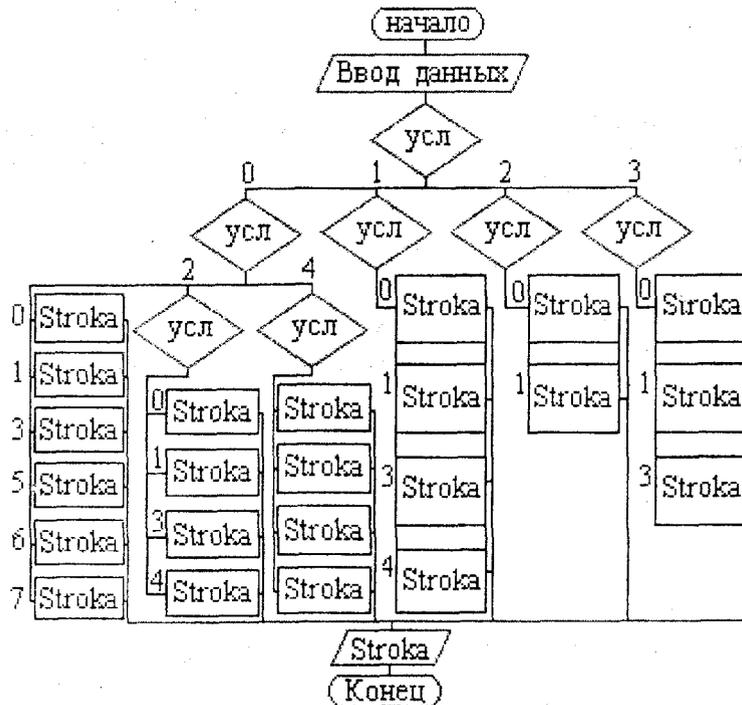


Рис. 2. Алгоритм рабочей программы

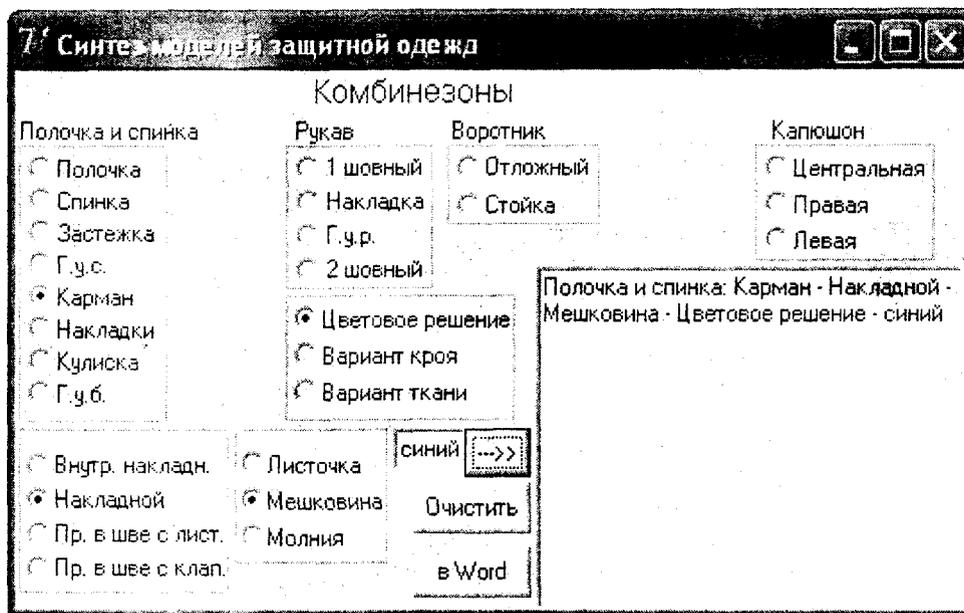


Рис. 3. Результат работы программы

Многообразие альтернатив вариантов технологических элементов конструкции требует от разработчиков определенных знаний и навыков, которые необходимо использовать в работе. Существуют базы данных по выпускаемым материалам, фурнитуре, скрепляющим материалам, последовательностям технологической обработки различных узлов и деталей. Предприятия, работающие по этим направлениям, могут предоставить информацию о своей продукции в виде файлов или баз данных.

В целях эффективного автоматизированного поиска необходимой конструкции модели защитной одежды разработана рабочая программа, позволяющая составить из множества вариантов конструктивных элементов модель новой, перспективной конструкции в целом (рис. 2, 3).

**Литература:**

- 1 Непрерывное профессиональное образование в области технологии, конструирования изделий легкой промышленности: Матер. третьей междунар. науч.-метод. конф. – М.: НИЦ «Инженер», 2001. – 160 с.
- 2 Некрасов Ю.Н. Проектирование и технология производства спортивной женской одежды / Ю.Н. Некрасов, А.С. Тарапанов. – СПб: СПГУДТ, 2004. – 176 с.
- 3 Половинкин А.И. Основы инженерного творчества: учебное пособие для студентов вузов. – М.: Машиностроение, 1988. – 368 с.
- 4 Информационные технологии в образовании, технике и медицине: Материалы международной конференции. В 3-х т. – Т.2. / Волгоград: Волг ГТУ. – 2004. – 333 с.

## ТЕХНОЛОГИЯ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

УДК 621.9

Д-р техн. наук, проф. Степанов Ю.С., канд. техн. наук. Барсуков Г.В., асп. Михеев А.В.  
(Орловский государственный технический университет)  
Россия, г. Орел, тел. (0862)419818; E-mail: upk@ostu.ru

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ АБРАЗИВНОГО ЗЕРНА ПРИ ГИДРОАБРАЗИВНОМ РЕЗАНИИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

*In article the approached decision of a problem introduction of an abrasive particle in a process able material is resulted at abrasive water jet cutting.*

Гидроабразивное резание, в отличие от гидравлического резания, заключается в обработке материалов струей жидкости с абразивом. В качестве жидкости наиболее часто используют чистую техническую воду, а в качестве абразива, например, обычный просеянный кварцевый песок.

Истекая из сопла малого диаметра под давлением 200 – 500 МПа, струя жидкости с абразивом обладает сверхзвуковой скоростью и кинетической энергией, достаточной для выполнения резания неметаллических материалов до 350 мм толщиной, металлов до 150 мм.

Основными отличительными признаками технологии гидроабразивной резки являются отсутствие теплового и механического воздействия на обрабатываемые изделия и малая доля потерь металла. Перечисленные признаки доминируют в авиационных технологиях при изготовлении деталей из дорогостоящих и чувствительных к температуре материалов (титановые сплавы). Для некоторых видов материалов и изделий – керамические, композиционные, многослойные, сотовые – не существует способа альтернативного технологии гидроабразивной резки. Технология гидроабразивной резки обеспечивает естественную совместимость с промышленными роботами в силу малости инерционных сил (менее 40 Н) действующего на инструмент и малого веса подвижных масс.

Постоянно растущий уровень требований потребителя к показателям качества и производительности процессов резки, разработка и создание новых материалов, большой сортамент и номенклатура разрезаемых изделий, многократность использования операций резки на стадиях изготовления детали определяет прогресс в совершенствовании существующих технологий, оборудования, инструмента.

Но, не смотря на то, что гидроабразивное резание – достаточно изученный процесс, единых подходов к управлению качеством процесса нет. Отсутствуют методики, позволяющие прогнозировать, что будет происходить с материалом при тех или иных технологических и силовых параметрах установки.

В основе процесса разрезания лежит эрозионное воздействие на металл высокоскоростного потока твердых частиц. Отделение частиц разрезаемого ма-

териала состоит из комбинированного действия механизмов резки, хрупкого разрушения, усталости, плавления. Скорость процесса эрозии зависит от кинетической энергии частиц, механических свойств разрезаемого материала, угла атаки, формы частиц [1].

Качество методов струйной обработки в значительной мере зависит от свойств и характеристик абразивного материала. В зависимости от физико-механических и химических свойств материалов, применяемых для обработки, их можно подразделить на следующие основные группы: газоабразивные, жидкие, твердые, способные в процессе струйной обработки или сразу после нее сублимироваться или растворяться.

Газообразные или жидкие материалы применяются как энергоносители для твердых, каждый из которых имеет свою область применения. В отличие от других методов струйной обработки, при гидроабразивной резке в большинстве случаев применяются неметаллические материалы. Для формообразования, изменения размеров и качества поверхностей чаще всего применяются минеральные абразивные материалы.

Абразивные материалы – это преимущественно материалы высокой твердости, природные и искусственные, применяемые для обработки менее твердых материалов. Для гидроабразивного резания они используются в виде зерна или порошков.

Обзор абразивов, применяемых в промышленности для гидроабразивного резания, показал, что наиболее часто используют:

– Гранат (90%) (Маркировка – 92 Е) – минерал, представляющий собой соединение алюминия, железа, хрома, кальция, магния и марганца с кремнистой кислотой. В зависимости от примесей гранат бывает темно-красного (пироп), красного (альмандин), оранжево-желтого (спессартин), буро-красного, черного (андрадит) или изумрудно-зеленого (уваровит) цветов. Микротвердость 1300–1650 г/см<sup>3</sup>, твердость по шкале Мооса 6,5 – 7,5; плотность 3,5 – 4,2 г/см<sup>3</sup>;

– Оливин (15%) минерал, силикат магния и железа (MgFe)SiO<sub>4</sub>. Название минерала определил его оливково-зеленый цвет. Окраска оливина может быть также серо-зеленой или золотисто-зеленой.

Блеск стеклянный. Твердость по шкале Мооса 6,5 – 7, плотность 3,2–3,6 г/см<sup>3</sup>;

– *Электрокорунд* (11%) – абразивный материал, состоящий из корунда (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) и небольшого количества примесей. Промышленность производит несколько разновидностей электрокорунда, в том числе нормальный, белый, хромистый, титанистый, циркониевый, моно- и сфорокорунд. Наиболее широко используются нормальный электрокорунд (маркировка – 16А – 12А), получаемый в электрических печах из бокситов. Микротвердость 1900 – 2000 кгс/мм<sup>2</sup>, плотность 3,85-3,95 г/см<sup>3</sup>;

– *Кремнезем* (11%). Диоксид кремния SiO<sub>2</sub>. Используется в различных видах: кристаллическом, стеклообразном. Твердость по Кнупу КН 475;

– *Карбид кремния*, карборунд, SiC, соединение кремния с углеродом. Один из важнейших карбидов, применяемых в технике. В чистом виде бесцветный кристалл с алмазным блеском; технический продукт зеленого или сине-черного цвета. Имеет исключительно высокую твердость (микротвердость 33400 Мн/м<sup>2</sup> или 3,34 тс/мм<sup>2</sup>), уступая только алмазу и карбиду бора В<sub>4</sub>С; хрупок; плотность 3,2 г/см<sup>3</sup>.

Абразивные материалы подвергаются переработке по различным технологическим схемам, таким, как дробление, измельчение, различные виды обогащения, термическая обработка, рассев, либо гидравлическая или пневматическая классификация. В результате получают зерно или порошок требуемой крупности (размера).

При гидроабразивной обработке имеет значение не только материал абразива, но и форма, а также состояние режущих кромок абразивных зерен.

Угловые параметры поверхностей на режущих лезвиях абразивных зерен имеют случайный, вероятностный характер и могут изменяться в широких пределах.

Абразивные зерна характеризуются также состоянием поверхности (гладкая, шероховатая), кромок и выступов (острые, закругленные, зазубренные и т.п.). С увеличением размера зерна возрастает радиус за-

кругления его кромок. У подавляющего большинства зерен углы при вершинах тупые (рис. 1).

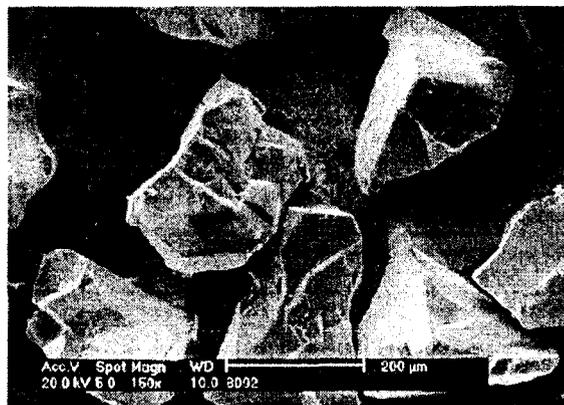


Рис. 1. Микросъемка абразивного зерна – гранат

Основными геометрическими параметрами, определяющими режущие способности абразивного зерна, является форма зерен, число вершин, углы при вершинах и радиусы скругления вершин. Известно, что форма зерна в значительной степени зависит от условий кристаллизации, роста кристаллов и их структуры. Многие кристаллы искусственного происхождения не имеют правильной геометрической формы. Даже природные абразивные материалы нечасто являются кристаллами правильной формы.

В связи с большим разнообразием форм абразивных зерен их можно условно разделить на три группы: кубические, сферические и тетраэдровидные (таблица 1).

Большое разнообразие геометрической формы и распределения режущих кромок абразивных зерен является основной трудностью при изучении механизма формирования микрогеометрии поверхности резания. При очень больших сжимающих нагрузках в местах контакта абразивных частиц, летящих со скоростью 200 ≤ v<sub>0</sub> ≤ 500 м/с, с материалом преграды, металл переходит в пластическое состояние, так как среднее гидростатическое давление значительно превосходит предел текучести материала.

Таблица 1 – Классификация формы абразива, используемого для гидроабразивного резания

ТЕТРАЭДР			Единица объема абразивного порошка включает 65% частиц тетраэдровидной формы, 25% частиц кубической и 10% сферической. Типоразмер содержит 85% основной, 10% мелкой и 5% крупной фракции.
КУБИЧЕСКИЕ			
СФЕРИЧЕСКИЕ			

Рассмотрим задачу о проникновении абразивной частицы в металл, когда угол между поверхностью и осью симметрии внедряемого тела небольшой. При этом необходимо учитывать вращение абразивной частицы вокруг центра масс и перемещение центра масс в плоскости, проходящей через ось симметрии перпендикулярно поверхности преграды.

Трудность такой задачи заключается в учете влияния свободной поверхности и искривления траектории движения, которые, несомненно, должны сказаться на перераспределении давления по поверхности головной части ударяющего тела.

Рассмотрим случай соударения тела, имеющего коническую головную часть, с металлом под небольшим углом к его поверхности, когда тело рикошетирует, не зарываясь глубоко в преграду. Такое поведение частицы подтверждается многими экспериментальными данными.

Для решения этой задачи введем допущения:

- 1) величина заглубления головной части  $\Delta$  меньше радиуса боковой цилиндрической поверхности абразивной частицы ( $\Delta \leq d/2$ );
- 2) угловая скорость вращения вокруг оси симметрии отсутствует, а вокруг центра масс равна нулю в начальный момент;
- 3) вектор скорости в начальный момент совпадает с осью симметрии тела;
- 4) избыточное давление для сжимаемой пластической среды, действующее на поверхность контакта головной части абразивной частицы с преградой, определяется по формулам [2]:

$$p = v^2 \frac{\rho_0}{b(v-2)} \left[ \frac{v-2}{v} \left( a^{\frac{v}{2}} - 1 \right) + b(v-2) a^{\frac{v}{2}} - \left( a^{\frac{v-1}{2}} - 1 \right) \right] \sin^2 \beta + \left( a^{\frac{v}{2}} - 1 \right) \left( \rho_0 + \frac{\tau_0}{v(1+\mu)} \right), \quad (1)$$

где  $a = 1/(1-b)$  – коэффициент;

$b = \rho_0/\rho(t) = const$ , так как за ударной волной плотность постоянна;

$\rho_0$  – начальная плотность материала преграды;

$\rho(t)$  – текущая плотность материала преграды;

$v$  – осевая составляющая скорости внедрения, м/с ( $v = 2\mu/[1+\mu]$ );

$\tau_0$  – предел текучести материала;

$\mu$  – коэффициент Пуассона.

Предположим, что в произвольный момент времени тело по отношению к преграде занимает положение, изображенное на рис. 2, где  $z\eta$  и  $x\eta$  – соответственно подвижная и не подвижная система координат. Определим проекции  $S_y$  и  $S_x$  на плоскости  $z\xi$  и  $y\xi$ :

$$\xi^2 + \left[ \left( \frac{d}{2} - \Delta \right) - z\alpha \right]^2 = tg^2 \beta \left( \frac{d}{2tg\beta} - z \right)^2. \quad (2)$$

Предположим, что  $\xi = 0$  и получим:

$$z_{max} = \frac{\Delta}{tg\beta} \left( 1 - \frac{\alpha}{tg\beta} \right)^{-1} \cong \frac{\Delta}{tg\beta} \left( 1 + \frac{\alpha}{tg\beta} \right).$$

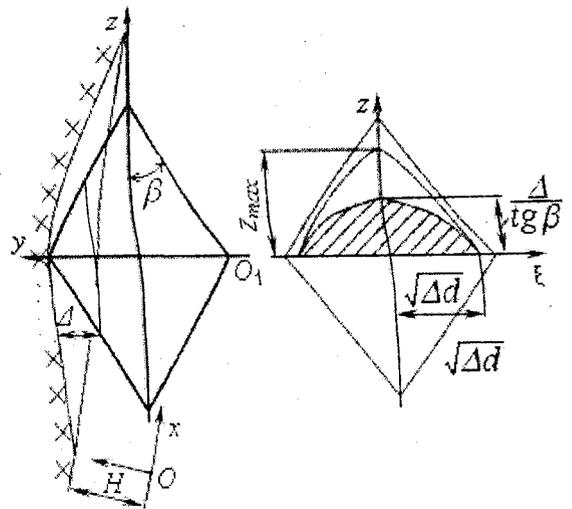


Рис. 2. Схема взаимодействия абразивной частицы с поверхностью обрабатываемого материала

Пренебрегая величинами второго порядка малости  $\Delta^2$  и  $(\alpha/tg\beta)^2$ , найдем зависимость площади  $S_y$  от  $\Delta$  и  $\alpha$ :

$$S_y = \frac{\sqrt{d\Delta^3}}{tg\beta} \left( 1 + \frac{\alpha}{tg\beta} \right). \quad (3)$$

Аналогичным способом найдем проекцию поверхности контакта на другую плоскость:

$$S_z = \sqrt{d\Delta^3} \left( 1 + \frac{\alpha}{tg\beta} \right). \quad (4)$$

Учитывая, что на всю поверхность контакта действует давление  $p$ , определяемое формулой (1), найдем значения осевой и поперечной силы, которые будут равны соответственно:

$$F_y = S_y p = \frac{\sqrt{d\Delta^3}}{tg\beta} \left( 1 + \frac{\alpha}{tg\beta} \right) p, \quad (5)$$

$$F_z = S_z p = \sqrt{d\Delta^3} \left( 1 + \frac{\alpha}{tg\beta} \right) p. \quad (6)$$

Приближенное значение результирующего момента этих сил относительно центра масс определяется формулой:

$$M = F_y \frac{\Delta}{tg\beta} - F_z \left( \frac{d}{2} - \frac{2}{3} \Delta \right), \quad (7)$$

Для составления уравнения движения тела вычислим проекцию осевой составляющей скорости на ось  $x$  и  $\eta$  неподвижной системы координат:

$$\dot{x} = v \cos \alpha, \quad \dot{\eta} = v \sin \alpha.$$

Теперь формулу (1) можно представить в виде:

$$p = \mathcal{K}k + w, \quad (8)$$

где переменные определяются по формулам:

$$k = \frac{\rho_0}{b(v-2)} \left[ \frac{v-2}{v} \left( a^{\frac{v}{2}} - 1 \right) + b(v-2) a^{\frac{v}{2}} - \left( a^{\frac{v-1}{2}} - 1 \right) \right] \sin^2 \beta,$$

$$w = \left( a^{\frac{v}{2}} - 1 \right) \left( p_0 + \frac{\tau_0}{v(1+\mu)} \right).$$

Запишем уравнения движения центра масс удаляющегося тела и вращения относительно него в неподвижной системе координат:

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= -F_x \cos \alpha + F_y \sin \alpha \\ m\ddot{y} &= -F_y \cos \alpha - F_x \sin \alpha, \\ I\ddot{\varphi} &= M \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= \sqrt{d(\eta - H_0)^3} [\ddot{x}k + \dot{w}] \left[ -\cos(\alpha_0 - \varphi) + \frac{1}{\operatorname{tg} \beta} \sin(\alpha_0 - \varphi) \right] \left( 1 + \frac{\alpha_0 - \varphi}{\operatorname{tg} \beta} \right) \\ m\ddot{y} &= -\sqrt{d(\eta - H_0)^3} [\ddot{x}k + \dot{w}] \left[ \frac{1}{\operatorname{tg} \beta} \cos(\alpha_0 - \varphi) + \sin(\alpha_0 - \varphi) \right] \left( 1 + \frac{\alpha_0 - \varphi}{\operatorname{tg} \beta} \right). \\ I\ddot{\varphi} &= \sqrt{d(\eta - H_0)^3} [\ddot{x}k + \dot{w}] \left[ \frac{(\eta - H_0)}{\operatorname{tg}^2 \beta} - \left( \frac{d}{2} - \frac{2}{3} [\eta - H_0] \right) \right] \left( 1 + \frac{\alpha_0 - \varphi}{\operatorname{tg} \beta} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

Начальные условия для системы уравнений (10):

$$\begin{aligned} \dot{x}(0) &= v_0 \cos \alpha_0, & x(0) &= 0 \\ \dot{y}(0) &= v_0 \sin \alpha_0, & y(0) &= H_0. \\ \dot{\varphi}(0) &= 0, & \varphi(0) &= \alpha_0 \end{aligned}$$

Таким образом, на основе приведенных зависимостей предложено выражение (10) для определения глубины внедрения абразива в результате единичного контакта.

В выражении (9) использованы следующие условные обозначения:  $m$  – масса тела;  $I$  – экваториальный момент инерции;  $\varphi = (\alpha_0 - \alpha)$  – изменение угла наклона оси симметрии тела к преграде.

Из рис. 2 видно, что:

$$\Delta = \eta - H_0, \quad \alpha = \alpha_0 - \varphi.$$

Подставляя эти зависимости в систему уравнений (9), получим:

Это позволяет рассчитать единичный и удельный объемный съём материала при гидроабразивном резании.

#### Литература:

- 1 Энциклопедия «Машиностроение»: в 4-х т. / Под ред. К.В. Фролова. – М.: Машиностроение, 2003. – Том 1-2. – 600 с.
- 2 Сагомоян А.Я. Проникание / А.Я. Сагомоян. – М.: Моск. ун-т, 1974.

УДК 621.924

Д-р техн. наук, проф. Степанов Ю.С., доц. Афанасьев Б.И., студ. Фомин Д.С.,  
(Орловский государственный технический университет, Технологический институт)  
Россия, г. Орел, тел. (4862)541503; E-mail: [tmsi@mail.ostu.ru](mailto:tmsi@mail.ostu.ru)

## ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ СТРУКТУРНО-НЕОДНОРОДНЫЙ ОТРЕЗНОЙ КРУГ

*The diamond-abrasive cutting wheel offered has an axially off center peripheral point and on a work surface of wheel faces there are corrugations made according to Archimedes's multiunit spirals that allows reduction of cutting temperature and avoiding burns and micro-cracks on the work piece surface and also increase rigidity of the point.*

Предлагаемая разработанная конструкция структурно – неоднородного высокоскоростного ротора относится к области технологии машиностроения к изготовлению алмазно-абразивного отрезного инструмента. Она может быть использована при изготовлении высокоскоростных отрезных кругов, применяемых в черной металлургии при резке на абразивно-отрезных станках заготовок из конструкционных, инструментальных коррозионностойких и жаропрочных сталей и сплавов.

Недостатками известных алмазно-абразивных отрезных инструментов [1, 2] являются повышен-

ные тепловыделения и быстрый износ кругов, особенно по вершинам выступов, т. е. по торцам, при этом малая осевая жесткость, которой обладают данные круги, ведет к снижению их работоспособности и снижению качества, а также пониженная механическая прочность, невысокая стойкость и быстрый износ кругов, особенно по торцам, сложность и трудоемкость правки, что снижает производительность резания и удорожает процесс.

Целью разработки данной конструкции является увеличение стойкости, механической прочности отрезных кругов и производительности резания,

уменьшение опасности появления прижогов путем снижения теплонапряженности резания, благодаря

осцилляции зоны резания, а также исключение прогиба наклонного круга.

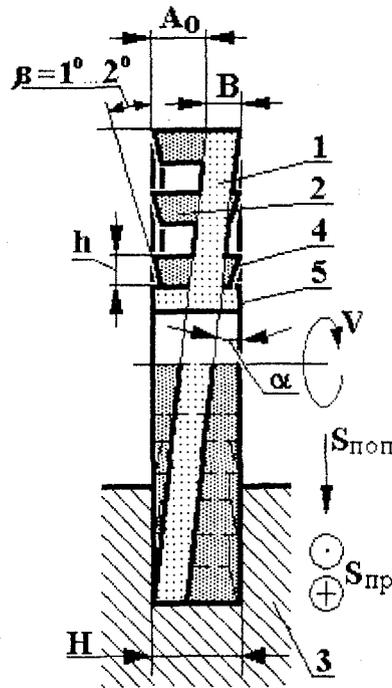


Рис. 1. Схема резания плоской заготовки и частичный продольный разрез предлагаемого отрезного круга

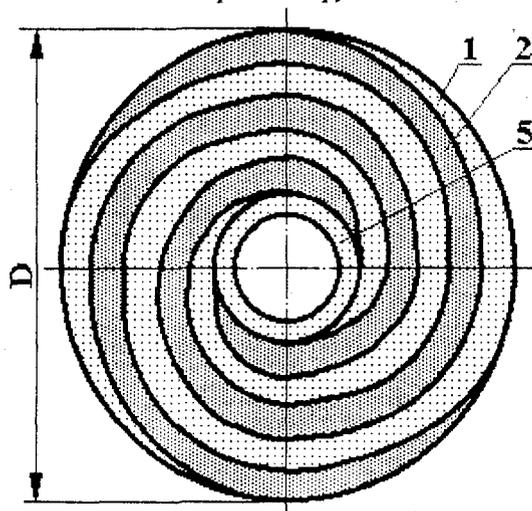


Рис. 2. Предлагаемый отрезной круг, вид с торца

Предлагаемый алмазно-абразивный отрезной круг имеет аксиально – смещенную периферийную режущую часть 1, представляющую собой отрезной круг, установленный под углом  $\alpha$  к плоскости, перпендикулярной оси вращения. Высота  $B$  аксиально – смещенной периферийной режущей части 1 круга меньше ширины  $H$  прорезаемого паза заготовки 3, это позволяет снизить температуру резания и исключить прижоги и микротрещины на обрабатываемых поверхностях. Поэтому угол  $\alpha$  зависит от высоты  $B$  режущей части 1, ширины  $H$  прорезаемого паза, диаметра  $D$  круга и определяется по формуле:

$$\alpha = \arctg[(H - B)/D], \quad (1)$$

где  $B$  и  $D$  – соответственно высота и наружный диаметр круга, мм;

$H$  – ширина прорезаемого паза, мм.

С целью увеличения осевой жесткости режущей части 1 круга, он имеет на рабочей поверхности торцев рифления 2, выполненные по Архимедовым многозаходным спиральям. На рис. 1 и 2 рифления 2 условно выделены более густым фоном, а круг имеет двухзаходные спирали.

Ширина  $h$  рифлений 2 назначается, исходя из общей жесткости круга и возможности его формирования, и приблизительно равна высоте  $B$  режущей части 1 круга. При этом для снижения сил трения плоскость выступов 4 рифлений 2 наклонена под углом  $\beta = 1^\circ \dots 2^\circ$  в радиальном направлении в сторону центра круга, а спирали рифлений выполнены многозаходными с четным количеством заходов, а начало Архимедовой спирали на каждом из торцев круга совпадает с одной из его образующей.

Для резания полупроводниковых пластин используют тонкие, шириной в доли миллиметра,

отрезные алмазные круги, от осевой жесткости которых зависит не только работоспособность самих кругов, но и качество, прежде всего точность, обработанной поверхности [3]. Такие круги будем считать кругами с низкой осевой жесткостью.

Благодаря рифлениям предлагаемые круги приобретают достаточно высокую осевую жесткость.

В работе алмазно-абразивного отрезного круга с аксиально – смещенной периферийной режущей частью 1 появляется параметрическая осцилляция, характеризующая амплитудой  $A_0$ , которая зависит от наружного диаметра и угла наклона круга, в свою очередь, влияющая на ширину  $H$  прорезаемого паза.

Благодаря осцилляции зоны резания, высоту круга берут меньше ширины прорезаемого паза, что существенно влияет на экономию дорогостоящего алмазно – абразивного материала.

В процессе износа круга с уменьшением наружного диаметра  $D$  при постоянном угле  $\alpha$  наклона аксиально – смещенной периферийной режущей части 1 будет уменьшаться ширина  $H$  прорезаемого паза путем самооформления рифлений 2, у которых происходит износ плоскостей выступов 4, при этом высокая осевая жесткость будет сохраняться.

Величина угла  $\beta$  принята больше нуля, но не более  $1^{\circ} \dots 2^{\circ}$ . Это минимальный положительный угол, при котором длина дуги контакта инструмента с заготовкой минимальная и соответственно незначительно и трение, т. е. увеличивается стойкость инструмента. С увеличением угла наклона плоскостей выступов рифлений ухудшается отвод тепла от режущего инструмента и снижается его прочность и стойкость. Минимальные положительные величины угла  $\beta$  являются оптимальными для снижения трения между обрабатываемой поверхно-

стью и исследуемым отрезным кругом.

В центральной части предлагаемого круга имеется ступица 5, к которой примыкают рифли 2 и которая служит для надежного крепления круга.

С целью повышения производительности алмазно – абразивной резки направление вращения отрезного круга выбирают совпадающим с направлением витка спирали от центра к периферии.

Предлагаемый отрезной круг изготавливается в пресс-форме, торцевые плиты которой со стороны соприкосновения с абразивной смесью имеют рифления, выполненные по спирали Архимеда.

Для определения преимуществ предложенной конструкции отрезного круга и способа резки была изготовлена по технологии силовой бакелизации партия отрезных кругов новой конструкции диаметром 500 мм и проведены сравнительные испытания с серийными кругами в заводских условиях при резке стали 45 диаметром 80 мм, результаты которых представлены в таблице.

Новая конструкция круга обеспечивает повышение коэффициента шлифования в среднем на 45%, стойкости круга на 45%, повышение производительности на 30%.

Таким образом, предлагаемый алмазно-абразивный отрезной круг с параметрической осцилляцией и с рифлениями на торцах уменьшает опасность появления прижогов путем снижения теплонапряженности резания за счет осцилляции зоны контакта круга с заготовкой и прерывистого резания, обладает повышенной износостойкостью, благодаря включению в работу торцовых частей круга, повышенной осевой жесткостью и прочностью и обеспечивает повышенную производительность резки [4].

Таблица 1 – Характеристики шлифовальных кругов

Характеристика круга	Номер круга	Начальный диаметр, мм	Конечный диаметр, мм	Число резцов	Время реза, с	$K_{ш}^*$
Абразивные отрезные круги по ГОСТ 2424-83, характеристики Д500×5×51, 14 А 63 СТ БУ, 80 м/с	1	500	312	22	21,1	1,06
	2	500	298	25	21,6	1,11
	3	500	303	24	20,6	1,10
	4	500	300	25	21,2	1,19
Предлагаемые абразивные отрезные круги, Д500 14 А 63 СТ БУ, 80 м/с, высота осциллирующей части В=3 мм, ширина рифлей h=3 мм, угол наклона режущей осциллирующей части $\alpha=0^{\circ}13'$ , ширина прорезаемого паза H=5 мм, спираль рифлей - двухзаходная	5	500	318	34	17,6	1,56
	6	500	311	32	16,3	1,51
	7	500	292	36	17,9	1,47
	8	500	313	34	16,8	1,42

$K_{ш}^*$  - отношение величины скорости съема металла к скорости износа абразива

**Литература:**

1 А. с. СССР № 306 011, МПК В 24 D 5/12. Абразивный отрезной круг. – Оpubл. 1971. – аналог.  
 2 Патент РФ 2235632, МПК В 24 D 5/12. Алмазно-абразивный отрезной круг с параметрической осцилляцией / Ю.С. Степанов, Б.И. Афанасьев [и др.]. – Заяв. 30.09.03, опубли. 10. 09.04. – Бюл. № 25.

3 Петасюк Г.А. Точность разрезания полупроводниковых пластин алмазными кругами // СТИН – 1998. – № 3. – С. 24-27.  
 4 Патент РФ 2279967, МКИ В 24 D 5/12. Стойкий осциллирующий отрезной круг /Ю. С. Степанов, Б.И. Афанасьев [и др.]. – Заяв. 15.02.05, опубли. 20.07.06. – Бюл. № 20.

## ТЕХНОЛОГИЯ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ

УДК 621.99

Канд. техн. наук, доц. Афонин А.Н.  
(Орловский государственный технический университет)  
Россия, г. Орел, тел. (4862)541503; E-mail: af@au.ru

## САПР РОЛИКОВ ПОВЫШЕННОЙ СТОЙКОСТИ ДЛЯ НАКАТЫВАНИЯ НАРУЖНЫХ РЕЗЬБ С ОСЕВОЙ ПОДАЧЕЙ

*The system of the automated designing of the complete set rollers for external thread rolling with axial submission on the basis of T-Flex CAD 3D, providing increase of its resistance stabilization of the instant area of a spot of contact of the tool and preparation is described.*

Современное интеллектуальное производство немислимо без применения систем автоматизированного проектирования (САПР), обеспечивающих значительное сокращение сроков и повышение качества проектных работ, позволяющих создавать единое информационное пространство предприятия с использованием CAES (PLM) технологий. Весьма высокий эффект достигается применением САПР в инструментальном производстве в связи с большим объемом расчетных работ при проектировании инструмента и гибким, единичным характером его производства. Наиболее распространены в промышленности на сегодняшний день САПР зуборезного инструмента, например червячных фрез.

САПР резьбонакатного инструмента пока не получили широкого распространения, хотя, по сложности проектирования и производства, резьбообразующий инструмент занимает второе место после зубообрабатывающего. В этой связи разработка современных САПР резьбонакатного инструмента является крайне актуальной задачей инструментального производства. В качестве примера подобной системы можно привести САПР роликов повышенной стойкости для накатывания наружных резьб с осевой подачей, разработанную в Орловском государственном техническом университете (ОрелГТУ).

Накатывание наружных резьб с осевой подачей на резьбонакатных станках или аксиальными резьбонакатными головками является одним из наиболее современных и перспективных способов резьбового формообразования. Данный способ позволяет получать резьбы практически неограниченной длины с высокой производительностью при высоком качестве. Однако на сегодняшний день оно имеет ряд существенных ограничений по области применения. В частности, из-за низкой стойкости резьбонакатного инструмента не нашло широкого применения накатывание резьбы на заготовках из труднообрабатываемых или предварительно упрочненных материалов.

Одним из основных направлений повышения стойкости роликов для накатывания резьбы с осевой подачей является обеспечение равномерности витков их заборной части. В производстве в основном нашли применение резьбонакатные ролики с расположением вершин витков заборной

части на прямой, что обуславливает одинаковую величину внедрения (текущее радиальное обжатие) для каждого витка. Так как каждому последующему витку приходится внедряться в канавку, образованную предыдущими витками, подобная схема приводит к значительной неравномерности нагружения витков и преждевременному разрушению последнего витка заборной части или первого витка калибрующей. С целью снижения неравномерности нагружения витков предлагалось образующую заборной части выполнять криволинейной – по параболе, гиперболе, логарифмической кривой, дуге эллипса или окружности, закону арифметической прогрессии и т.д. Однозначного мнения о том, какой способ профилирования является оптимальным, не достигнуто. Поскольку величина сил, действующих на виток резьбонакатного инструмента, пропорциональна мгновенной площади пятна контакта данного витка с заготовкой (МПК), обеспечить равномерность всех витков заборной части можно, обеспечив равенство их МПК. Аналитический расчет МПК при резьбонакатывании требует решения задачи о пересечении в пространстве тел сложной, криволинейной формы, и возможен в настоящее время только для некоторых простых случаев, не представляющих практической ценности. Приближенные методики определения МПК, например, показанные в работе [1], не всегда обеспечивают приемлемую точность расчетов. Вычислить МПК при накатывании резьб и разработать резьбонакатной инструмент повышенной стойкости, обеспечивающий ее стабилизацию, можно путем геометрического объемного (3D) моделирования процесса накатывания в современных САД системах среднего и высшего уровней, имеющих встроенные возможности трехмерного моделирования тел сложной криволинейной формы, определения их площадей и объемов, а также оптимизации размеров по задаваемым критериям [2, 3].

С использованием данной методики в ОрелГТУ разработана система автоматизированного проектирования комплекта роликов для аксиальных резьбонакатных головок на основе отечественной САД-системы среднего уровня T-Flex CAD 3D. САПР представляет собой документ T-Flex CAD 3D версии 7.2, состоящий из 3D окна, содержащего

3D модели, необходимые для определения диаметра заготовки под накатывание резьбы и построения рационального профиля заборной части; 2D окна, содержащего параметрический чертеж комплекта резьбонакатных роликов для аксиальной резьбонакатной головки, и пользовательского интерфейса (диалога пользователя), обеспечивающего удобство применения САПР.

Исходными данными для проектирования являются габаритные размеры резьбонакатного ролика, диаметр посадочного отверстия, тип и шаг накатываемой резьбы.

Для расчета рациональных параметров резьбонакатных роликов используются встроенные функции оптимизации T-Flex CAD.

При геометрическом трехмерном моделировании процесса накатывания для упрощения модели и сокращения машинного времени на ее пересчет при оптимизации  $n$ -ное количество роликов комплекта можно представить как один ролик с заборной ча-

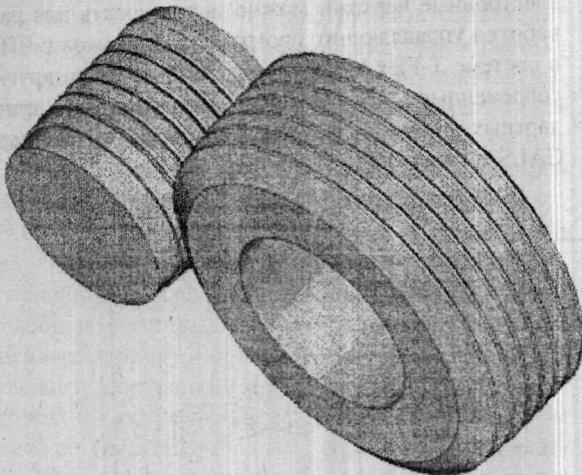


Рис. 1. 3D модель заготовки с накатываемой резьбой

Для построения 3D модели заготовки необходимо определить ее исходный диаметр под накатывание резьбы. В настоящее время точные аналитические формулы разработаны только для расчета диаметра заготовок под накатывание резьб сравнительно простой формы, например треугольных или трапециевидных. В большинстве случаев диаметр заготовки подбирается экспериментальным путем. Так как задача определения диаметра заготовки под накатывание резьбы сводится к задаче по определению объема металла, выдавливаемого из впадин резьбы заготовки в выступы, для ее решения также можно использовать 3D моделирование [4]. Для расчета диаметра заготовки в САПР имеются 2 отдельных твердых тела – спирали, имеющие один виток с шагом, равным шагу накатываемой резьбы (рис. 2), соответствующие объемам металла, выдавливаемого инструментом из впадин и вытесняемого в выступ. В соответствии с принципом равенства объемов металла до и после пластической деформации объемы данных спиралей должны быть равны между собой. Для определения диаметра заготовки под накатывание резьбы сформировано задание на оптимизацию, позволяющее рассчитать диаметр заготовки, обеспечивающий равенство объемов данных спиралей.

стью, длина которой в  $n$  раз больше длины заборной части каждого ролика комплекта. Таким образом, в САПР имеется параметрическая 3D модель накатывания резьбы аксиальной резьбонакатной, состоящая из одного пространственного тела, представляющего собой результат булевой операции вычитания из 3D модели заготовки с накатываемой резьбой 3D модели резьбонакатного ролика (рис. 1). В результате выполнения булевой операции вычитания на 3D модели заготовки сформированы отпечатки, площади которых равны МПК витков инструмента и заготовки при накатывании резьбы. При этом с помощью встроенной функции T-Flex CAD созданы переменные (параметры), численно равные площади каждого отпечатка. Для определения рациональной формы профиля заборной части сформированы задания на оптимизацию, позволяющие добиться минимальных значений разностей МПК всех витков заборной части роликов комплекта, т.е. обеспечить их равнонагруженность.

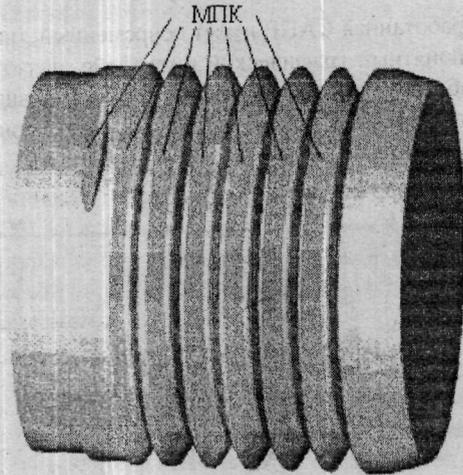
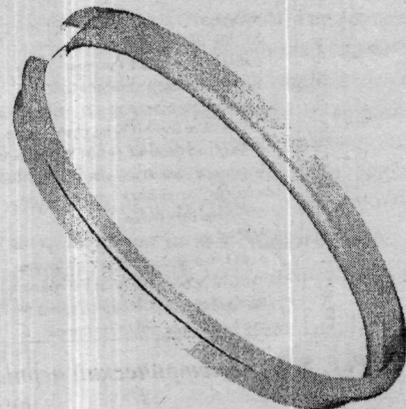


Рис. 2. 3D модели объемов металла, нераспределяемых из впадины в выступ при накатывании треугольных резьб



Проектирование комплекта роликов повышенной стойкости для аксиальной резьбонакатной головки в разработанной САПР осуществляется следующим образом:

1 Из верхнего меню с помощью команды «Параметры | Модель» вызывается окно «Параметры ролика» (рис. 3), в котором вводятся исходные данные.

2 Открывается 3D окно.

- 3 Запускается задание на расчет диаметра заготовки (рис. 4).
- 4 Запускаются задания на расчет рационального профиля заборной части.
- 5 Пересчитывается 3D модель.
- 6 Открывается 2D окно с параметрическим чертёжом комплекта роликов (рис. 5).

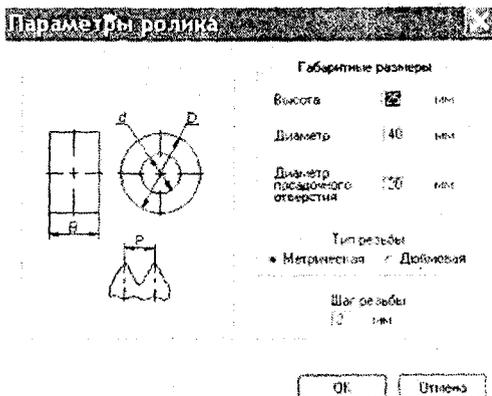


Рис. 3. Окно «Параметры ролика»

Разработанная САПР имеет современный, интуитивно понятный графический интерфейс, позволяющий работать с ней инженеру – инструментальщику, не являющемуся опытным пользователем персонального компьютера (ПК).

Система имеет внутреннюю базу данных с размерами стандартизованных треугольных резцов (метрических и дюймовых) и позволяет получать параметрические рабочие чертежи комплектов роликов для аксиальных резьбонакатных головок и резьбонакатных полуавтоматов.

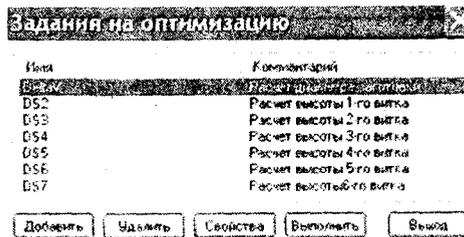


Рис. 4. Окно заданий на оптимизацию

Производственные испытания показали, что спроектированный с помощью разработанной САПР инструмент за счет равнонагруженности витков заборной части имеет стойкость в 1,5...2 раза выше, чем традиционный. Полученные с помощью САПР электронные чертежи можно использовать для разработки управляющих программ для станков с ЧПУ в системе T-Flex-ЧПУ или экспортировать в другие современные САМ системы с использованием стандартных форматов файлов, применяемых в рамках CALS технологий (STEP и Iges).

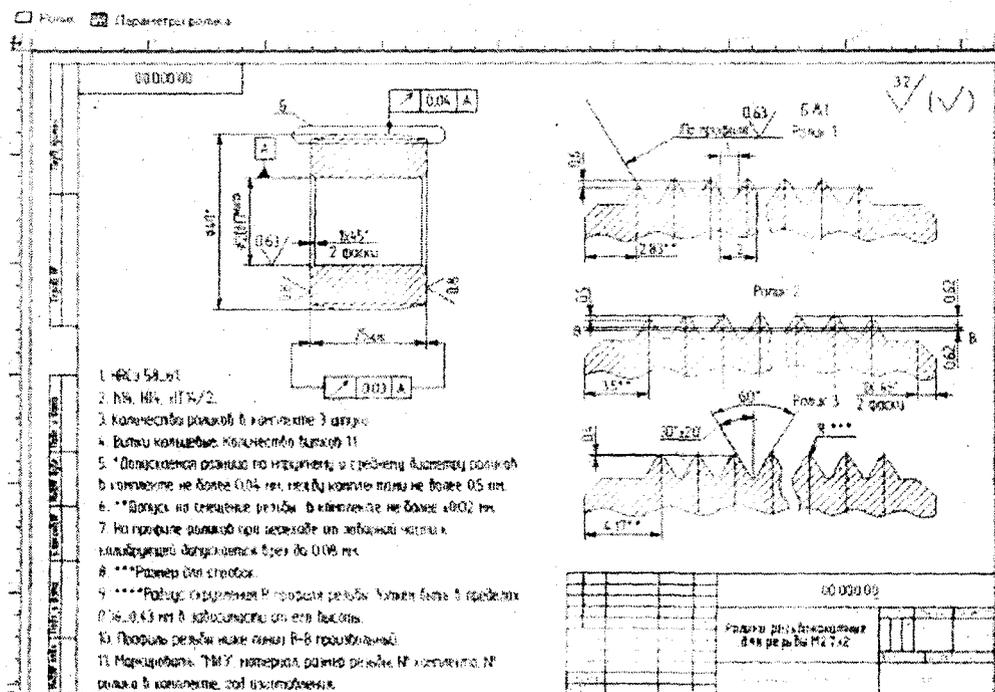


Рис. 5. Параметрический чертёж комплекта резьбонакатных роликов к аксиальной резьбонакатной головке

Проектирование САПР производилось при поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-2572.2005.8

**Литература:**

1 Киричек А.В. Расчет профиля заборной части резьбонакатного инструмента. / А.В. Киричек, И.Б. Кульков, А.Н. Афонин // СТИН, 2000. – №8. – С. 20-25.  
 2 Киричек А.В. Геометрическое моделирование процессов обработки давлением с локальным кон-

тактом инструмента и заготовки / А.В. Киричек, А.Н. Афонин, К.В. Иванов // Кузнечно – штамповочное производство, 2004. – № 9. – С. 21-25.

3 Афонин А.Н. Применение T-Flex CAD для расчета и проектирования металлообрабатывающего инструмента // САПР и графика, 2005. – №8. – С. 81-84.

4 Киричек А.В. Определение диаметра заготовок под накатывание резьбы с помощью систем 3D моделирования / А.В. Киричек, А.Н. Афонин // СТИН, 2005. – №6. – С. 28-30.

## ТЕХНОЛОГИЯ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ

УДК 621.914.7+621.992.5

Асп. Бородин М.В., канд. техн. наук Брусов С.И., д-р техн. наук, проф. Тарапанов А.С.  
(Орловский государственный технический университет)  
Россия, г. Орел, тел. (4862)541503; E-mail: tmsi@mail.ostu.ru

### МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ВИНТОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ОБРАБОТКЕ РОТОРОВ ГЕРОТОРНЫХ НАСОСОВ

*In the issue the calculation method of the depending roughness of a helix surface of a gerotoral pump rotor is developed, during which analysis are determined of helicoids parameters and cutting tool geometry on the basis mathematical display of the kinematical scheme of processing the helix surfaces.*

Процесс механической обработки винтовых поверхностей деталей машин является достаточно сложным. Так как работа инструмента происходит по методу бесцентроидного обката, при обработке винтовой поверхности происходит постоянное изменение толщин срезаемых слоев для каждой точки режущих лезвий инструмента.

Особенностями винтовой поверхности роторов героторных одновинтовых насосов является то, что сечение винта представляет собой окружность, а ось – пространственную синусоиду.

Наиболее распространенные способы обработки подобных винтовых поверхностей: фрезерование дисковой фрезой и обработка точением. В них основными движениями являются вращательное или возвратно-поступательное движение резания и сложное движение подачи, состоящее из вращательного движения заготовки вокруг своей оси и согласованного с ним поступательного продольного перемещения, равного шагу винтовой поверхности за один оборот заготовки.

Наиболее важным параметром, влияющим на производительность, коэффициент полезного действия (КПД) и ресурс работы винтовых насосов, является шероховатость поверхности винтов. Понижение шероховатости рабочих поверхностей ведет к увеличению КПД насоса [1, 2].

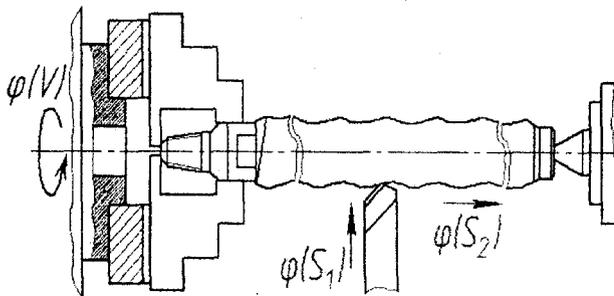


Рис. 1. Схема обработки точением роторов героторных насосов

Сформировавшееся в последние годы учение об инженерии поверхности позволяет расчетно-аналитическим путем определить основные параметры шероховатости, связать их с параметрами

режима резания и эксплуатационными характеристиками получаемой поверхности.

Так как на формирование профиля шероховатости при всех методах обработки оказывают влияние одни и те же факторы, в каждом конкретном случае различающиеся лишь интенсивностью воздействия, то данный подход может быть применен для процессов лезвийной и абразивной обработки со сложной кинематикой.

Общая формула для определения средней высоты профиля шероховатости для всех методов механической обработки имеет вид [3]:

$$R_z = h_1 + h_2 + h_3 + h_4, \quad (1)$$

где  $h_1$  – составляющая профиля шероховатости, обусловленная геометрией и кинематикой перемещения рабочей части инструмента;  
 $h_2$  – составляющая профиля шероховатости, обусловленная колебаниями инструмента относительно обрабатываемой поверхности;  
 $h_3$  – составляющая профиля шероховатости, обусловленная пластическими деформациями в зоне контакта инструмента и заготовки;  
 $h_4$  – составляющая профиля шероховатости, обусловленная шероховатостью рабочих поверхностей инструмента.

Для случая лезвийной обработки точением ротора героторного насоса математическое отображение схемы резания имеет вид [4]:

$$\begin{cases} x = p\varphi(S); \\ y = [R\cos\varphi(V) + R\sin\varphi(S)]\cos\varphi(S) - R\sin\varphi(V)\sin\varphi(S); \\ z = [R\cos\varphi(V) + R\sin\varphi(S)]\sin\varphi(S) + R\sin\varphi(V)\cos\varphi(S). \end{cases} \quad (2)$$

где  $\varphi(S)$  – угол поворота винта;  
 $\varphi(V)$  – элементарное перемещение производящей поверхности инструмента;  
 $R$  – начальный радиус ротора;  
 $p$  – винтовой параметр.

Из математической модели схемы резания при обработке точением определим координаты вершины микронеровности обрабатываемой поверхности в проекции плоскость YOZ (рис. 2):

$$\begin{cases} y_A = R \sin \varphi(S); \\ z_A = p \varphi(S). \end{cases} \quad (3)$$

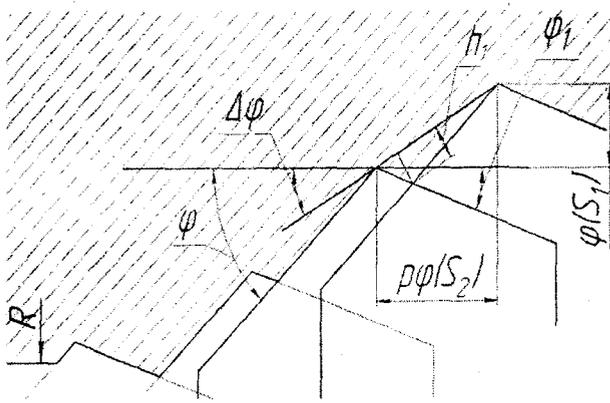


Рис. 2. Схема для определения величины  $h_1$  при точении и фрезеровании дисковой фрезой винтовой поверхности

Соответственно, составляющая профиля шероховатости, обусловленная геометрией и кинематикой перемещения рабочей части инструмента  $h_1$ , определяется из выражения:

$$h_1 = \frac{\sqrt{y_A^2 + z_A^2} \sin(\varphi \pm \Delta\varphi) \sin(\varphi_1 \pm \Delta\varphi)}{\sin(\varphi + \varphi_1)}, \quad (4)$$

где  $\varphi$  – главный угол в плане;  
 $\varphi_1$  – вспомогательный угол в плане;  
 $y_A, z_A$  – координаты вершин микронеровностей;  
 $\Delta\varphi$  – угол между нормалью к поверхности резания и направлением подачи:

$$\Delta\varphi = \frac{1}{2} \arctg \frac{p \varphi(S)}{R \sin \varphi(S)}. \quad (5)$$

Аналогичным образом, исходя из математического отображения схемы резания, находим величину  $h_1$ , составляющую профиля шероховатости, обусловленную геометрией и кинематикой перемещения рабочей части инструмента, при фрезерной обработке винтовой поверхности.

Математическое отображение схемы резания при обработке винтовой поверхности фрезерованием дисковой фрезой имеет вид:

$$\begin{cases} x = (\varphi(L) / \operatorname{tg} \varphi_1) + p \varphi(S); \\ y = R_\phi \sin \varphi(V) \sin \varphi(S); \\ z = [R - R_\phi \cos \varphi(V) + \varphi(L) \operatorname{tg} \varphi_1 - R \sin \varphi(S)] \cos \varphi(S); \end{cases} \quad (6)$$

где  $\varphi(L)$  – параметр режущего лезвия инструмента;  
 $\varphi(S)$  – угол поворота винта;  
 $\varphi(V)$  – мгновенный угол поворота фрезы;  
 $\varphi_1$  – вспомогательный угол в плане;  
 $R$  – начальный радиус винта;  
 $R_\phi$  – радиус фрезы;  
 $p$  – винтовой параметр.

Из математической модели схемы резания при обработке дисковой фрезой координаты вершины микронеровности в проекции плоскость YOZ соответственно равны (рис. 2):

$$\begin{cases} y_A = R \sin \varphi(S); \\ z_A = \frac{p \varphi(S)}{z}. \end{cases} \quad (7)$$

где  $z$  – количество зубьев фрезы.

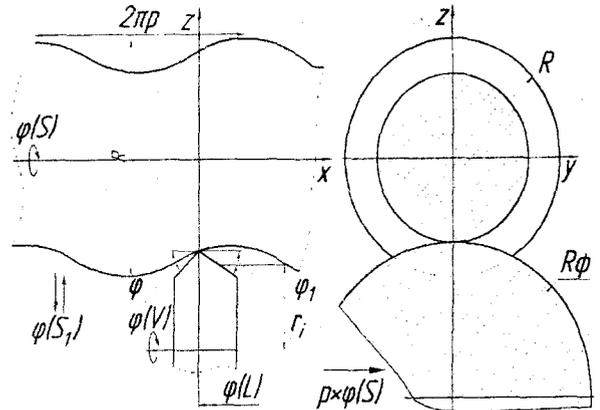


Рис. 3. Схема обработки ротора героторного насоса дисковой фрезой

Составляющая профиля шероховатости  $h_2$ , обусловленная колебаниями инструмента относительно обрабатываемой поверхности, не может быть постоянной в пределах угла контакта фрезы с заготовкой, поскольку в каждый момент времени изменяется толщина срезаемого слоя и рабочие углы на каждом участке зуба инструмента и, соответственно, составляющие силы резания.

Составляющая профиля шероховатости  $h_2$  при лезвийной обработке определяется амплитудой колебаний вершины инструмента относительно обрабатываемой поверхности при его прохождении по выступу или впадине исходной шероховатости и неравномерностью твердости заготовки на различных участках обрабатываемой поверхности:

$$h_2 = \frac{P_{изг}}{j}, \quad (8)$$

где  $P_{изг}$  – изгибающая сила, действующая на заготовку со стороны инструмента;  
 $j$  – жесткость технологической системы.

$$P_{изг} = \sqrt{P_z^2 + P_y^2}, \quad (9)$$

где  $P_z, P_y$  – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания [4].

Пластическое оттеснение обрабатываемого материала заготовки в зоне резания приводит к увеличению высоты образующей шероховатости на величину  $h_3$ , которая рассчитывается по формуле:

$$h_3 = \frac{b_{сдв} \cdot (2s + b_{сдв})}{32 \cdot r}, \quad (10)$$

где  $b_{сдв}$  – величина пластического оттеснения:

$$b_{сдв} = 0,5 \cdot \rho \left( 1 - \frac{\tau_{сдв}}{\sqrt{\tau_{сдв}^2 + \sigma_T^2}} \right), \quad (11)$$

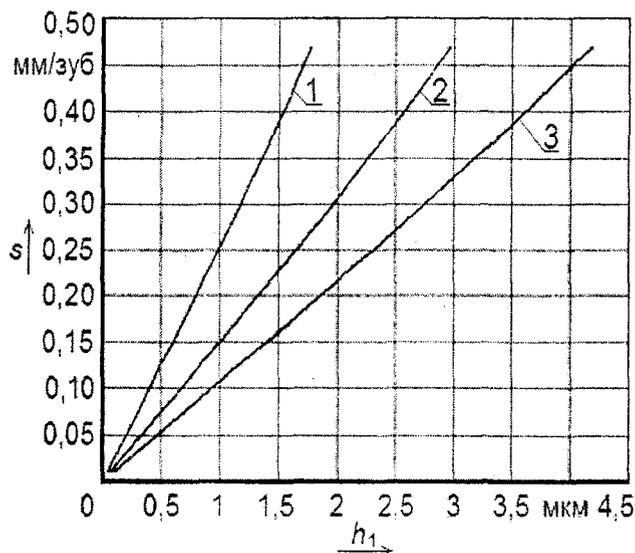
где  $\tau_{сдв}$  – прочность материала заготовки на сдвиг;  
 $\sigma_T$  – предел текучести материала заготовки;  
 $\rho$  – радиус вспомогательной режущей кромки.

Составляющая профиля шероховатости  $h_1$ , обусловленная шероховатостью рабочих поверхностей режущего инструмента, определяется средней высотой профиля шероховатости на вершине инструмента, т. е.  $h_1 = R_{zв.р.}$  и зависит от технологии заточки и режимов резания.

Наибольшее влияние на образование составляющей профиля шероховатости, обусловленной колебаниями инструмента относительно обрабатываемой поверхности (рис. 7: 1 -  $\varphi = 40^\circ$ ;  $\varphi_1 = 15^\circ$ ), оказывает подача при ее значении  $s = 0,45$  мм/зуб. При дальнейшем увеличении значения, подача практически

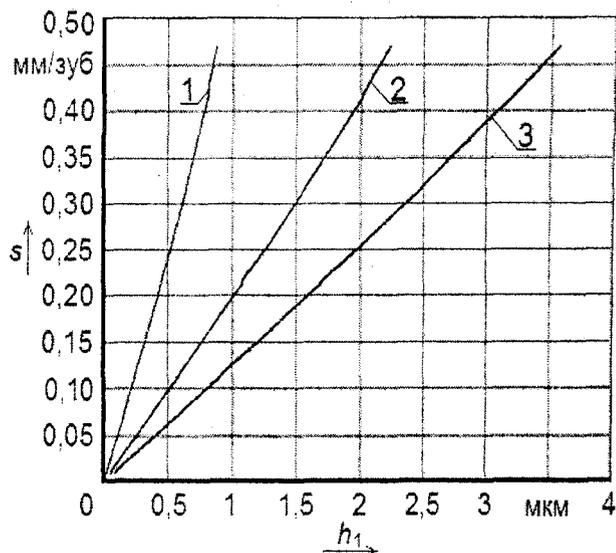
уже не сказывается на изменении шероховатости обработанной поверхности. Однако при увеличении углов в плане резца (рис. 7: 2 -  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\varphi_1 = 20^\circ$ ; 3 -  $\varphi = 50^\circ$ ;  $\varphi_1 = 25^\circ$ ) увеличение подачи продолжает способствовать росту шероховатости.

При увеличении винтового параметра в условиях постоянного радиуса обрабатываемой заготовки (рис. 6, рис. 7) влияние подачи на величину  $h_1$  ослабевает, тогда как при увеличении радиуса с постоянным винтовым параметром наблюдается увеличение влияния подачи на данную величину.



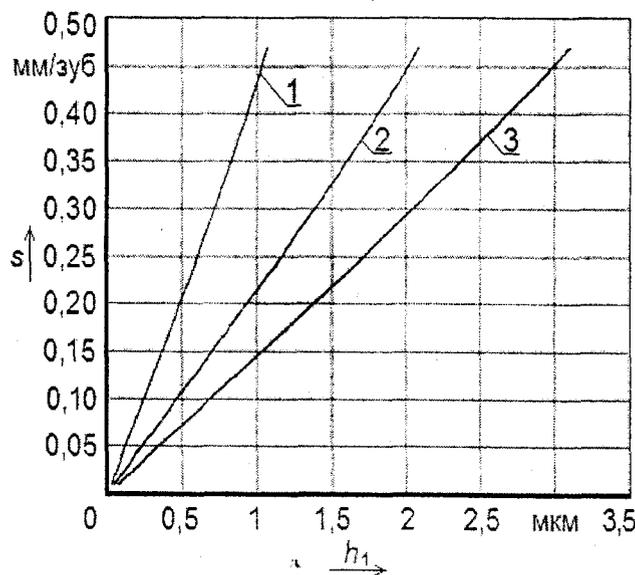
$p = 10$  мм,  $R = 35$  мм; 1 -  $\varphi = 40^\circ$ ,  $\varphi_1 = 15^\circ$ ; 2 -  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\varphi_1 = 20^\circ$ ; 3 -  $\varphi = 50^\circ$ ,  $\varphi_1 = 25^\circ$

Рис. 4. График зависимости составляющей профиля шероховатости, обусловленной колебаниями инструмента относительно обрабатываемой поверхности от подачи, при изменении углов в плане резца



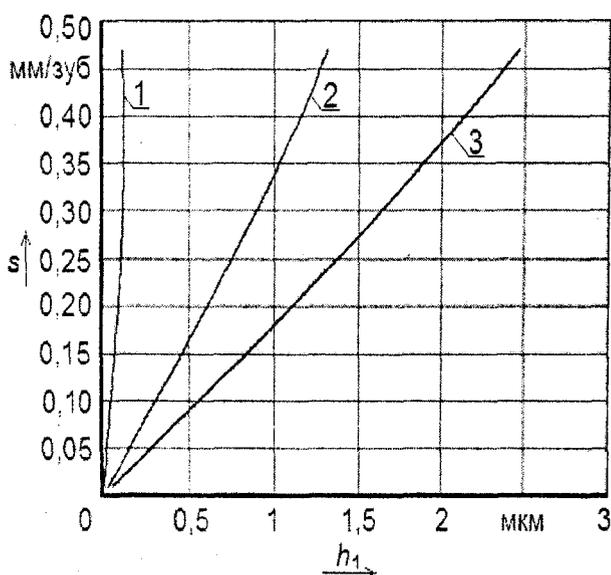
$p = 15$  мм,  $R = 35$  мм; 1 -  $\varphi = 40^\circ$ ,  $\varphi_1 = 15^\circ$ ; 2 -  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\varphi_1 = 20^\circ$ ; 3 -  $\varphi = 50^\circ$ ,  $\varphi_1 = 25^\circ$

Рис. 5. График зависимости составляющей профиля шероховатости, обусловленной колебаниями инструмента относительно обрабатываемой поверхности от подачи, при изменении углов в плане резца



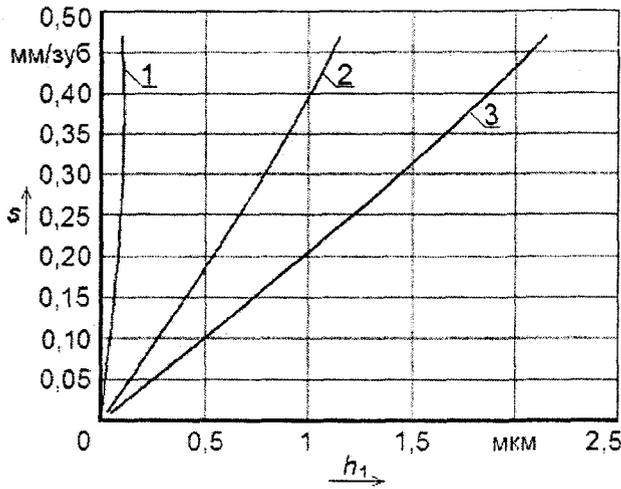
$p = 10$  мм,  $R = 28$  мм; 1 -  $\varphi = 40^\circ$ ,  $\varphi_1 = 15^\circ$ ; 2 -  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\varphi_1 = 20^\circ$ ; 3 -  $\varphi = 50^\circ$ ,  $\varphi_1 = 25^\circ$

Рис. 6. График зависимости составляющей профиля шероховатости, обусловленной колебаниями инструмента относительно обрабатываемой поверхности от подачи, при изменении углов в плане резца



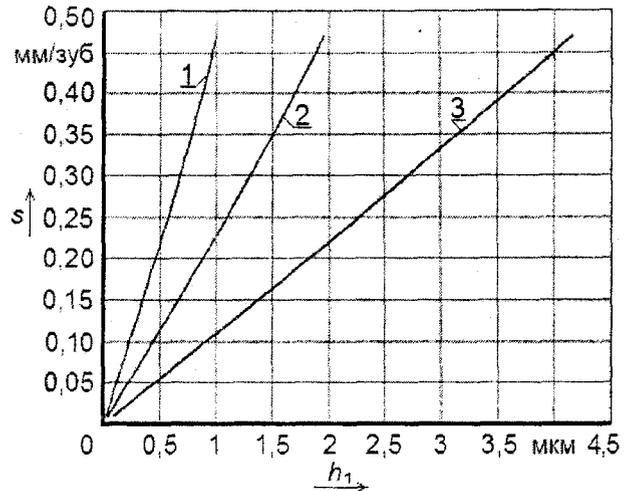
$p = 15$  мм,  $R = 28$  мм; 1 -  $\varphi = 40^\circ$ ,  $\varphi_1 = 15^\circ$ ; 2 -  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\varphi_1 = 20^\circ$ ; 3 -  $\varphi = 50^\circ$ ,  $\varphi_1 = 25^\circ$

Рис. 7. График зависимости составляющей профиля шероховатости, обусловленной колебаниями инструмента относительно обрабатываемой поверхности



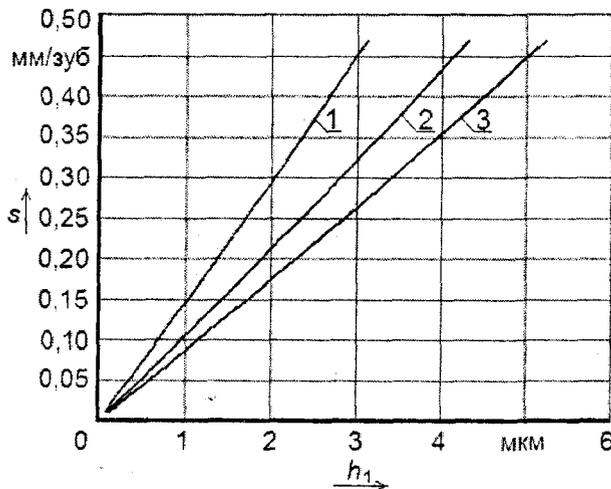
$p = 15 \text{ мм}, R = 28 \text{ мм}; 1 - \varphi = 40^\circ, \varphi_1 = 15^\circ; 2 - \varphi = 45^\circ, \varphi_1 = 20^\circ; 3 - \varphi = 50^\circ, \varphi_1 = 25^\circ$

Рис. 8. График зависимости составляющей профиля шероховатости, обусловленной колебаниями инструмента относительно обрабатываемой поверхности от подачи, при изменении углов в плане дисковой фрезы



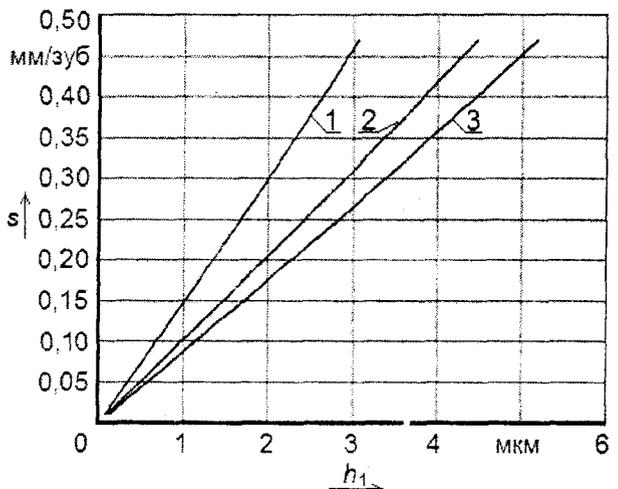
$p = 10 \text{ мм}, R = 28 \text{ мм}; 1 - \varphi = 40^\circ, \varphi_1 = 15^\circ; 2 - \varphi = 45^\circ, \varphi_1 = 20^\circ; 3 - \varphi = 50^\circ, \varphi_1 = 25^\circ$

Рис. 9. График зависимости составляющей профиля шероховатости  $h_1$  от подачи при изменении углов в плане дисковой фрезы



$p = 10 \text{ мм}, R = 35 \text{ мм}; 1 - \varphi = 40^\circ, \varphi_1 = 15^\circ; 2 - \varphi = 45^\circ, \varphi_1 = 20^\circ; 3 - \varphi = 50^\circ, \varphi_1 = 25^\circ$

Рис. 10. Зависимость составляющей профиля шероховатости  $h_1$  от подачи, при изменении углов в плане дисковой фрезы



$p = 15 \text{ мм}, R = 35 \text{ мм}; 1 - \varphi = 40^\circ, \varphi_1 = 15^\circ; 2 - \varphi = 45^\circ, \varphi_1 = 20^\circ; 3 - \varphi = 50^\circ, \varphi_1 = 25^\circ$

Рис. 11. Изменение составляющей профиля шероховатости  $h_1$  в зависимости от подачи на оборот инструмента при изменении углов в плане дисковой фрезы

Интенсивность влияния подачи на составляющую профиля шероховатости, обусловленную геометрией и кинематикой перемещения рабочей части инструмента, зависит от значения подачи. Если подача при точении меньше 0,5 мм/зуб, ее влияние на высоту неровностей заметно ослабевает.

При сравнении фрезерования и точения видно (рис. 7, рис. 8), что при фрезеровании наблюдается уменьшение величины  $h_1$  при одинаковых параметрах винта, а при уменьшении шага винтовой поверхности (рис. 6, рис. 9) изменение  $h_1$  незначительны.

Из приведенных выше зависимостей и имеющихся результатов исследований следует, что параметры шероховатости поверхности при лезвийной обработке зависят от режимов обработки, геометрии режущей части инструмента, его заточки, определяющей шероховатость режущей кромки, жесткости

технологической системы, физико-механических свойств обрабатываемого материала и исходной шероховатости обрабатываемой поверхности.

**Литература:**

- 1 Балденко Д.Ф. Винтовые насосы. – М.: Машиностроение, 1982. – 224 с.
- 2 Жмудь А.Е. Винтовые насосы с циклоидальным зацеплением. – М.: Машигиз, 1963. – 153 с.
- 3 Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.
- 4 Бородин М.В. Определение силовых характеристик обработки винтовых поверхностей роторов героторных насосов / М.В. Бородин, С.И. Брусов, А.С. Тарапанов // Труды международного научного симпозиума «Гидродинамическая теория смазки – 120 лет». Т. 2. – Орел: ОрелГТУ, 2006. – С. 257-265.

## СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

УДК 681.5.08

Канд. техн. наук Углова Н.В., канд. техн. наук, доц. Лисовская З.П.  
(Орловский государственный технический университет)  
Россия, г. Орел, тел. (4862)419876; E-mail: [pms35@mail.ostu.ru](mailto:pms35@mail.ostu.ru)

### СТАНДАРТИЗАЦИЯ КАК МЕХАНИЗМ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ В ЗДРАВООХРАНЕНИИ

*The article dwells on the questions of standardization in health care. The relevancy of standardization as mechanism of quality control is clearly shown. Also the line of standard document is carefully scrutinized including some such leaves.*

Проблемы управления качеством медицинской помощи становятся в настоящее время определяющим фактором дальнейшего развития здравоохранения страны. Без обеспечения должного качества невозможно, неэтично оказание медицинской помощи. К сожалению, наша система сегодня законодательно гарантирует не качество, а только доступность. Более того, за последние годы само понятие доступности изменилось. С одной стороны, гражданам России стали доступны технологии, о которых ранее можно было только мечтать: дорогостоящие высокоэффективные лекарства появились на российском фармацевтическом рынке, стали возможными сложные высокотехнологические методы диагностики и лечения. С другой стороны – далеко не все нуждающиеся могут пока получить эти лекарства и услуги.

Управление качеством должно строиться на соблюдении принципа справедливости, законности, равной доступности не просто помощи, а качественной помощи.

Сегодня необходимо говорить о государственной программе обеспечения качества. Хотя она пока такая не существует, ее прообразом следует признать Программу управления качеством в здравоохранении, которая была сформирована и утверждена Коллегией Министерства здравоохранения РФ в 2003 г.

Программа, несмотря на то, что носила в существенной степени декларативный характер, способствовала активизации деятельности по управлению качеством в ряде регионов, учреждений и на федеральном уровне. Принятие Программы на Коллегии Минздрава (кстати, первой управленческой целевой программы) означало, что проблема обеспечения качества, управления качеством признана приоритетной для здравоохранения. Программа нуждается в детализации, но ее отдельные положения уже реализуются в настоящее время.

На пути формирования системы управления качеством в здравоохранении сегодня приходится сталкиваться с определенными трудностями. Говоря о дальнейшем развитии системы управления качеством, необходимо понимать, что тяжесть решения проблем окажется перенесенной в медицин-

ские организации, на уровень взаимодействия врача, медицинской сестры и пациента. Частично это трудности объективного характера, которые не могли не возникнуть, поскольку невозможно сразу найти наиболее правильные (оптимальные) решения в меняющейся, неопределенной среде. Это трудности, связанные с несовершенством законодательной базы, недостаточными для работы в современных условиях знаниями и навыками у медицинских специалистов и управленцев, с дефицитом времени и финансовых средств. В то же время, есть и субъективные трудности, которые связаны с нежеланием многих специалистов принимать необходимые изменения, учиться работать по-другому, со столкновением различных интересов участвующих в работе лиц и коллективов [1].

Долгое время в нашей стране считалось, что стандартизация – это прерогатива технических областей народного хозяйства. Однако со временем пришло понимание того факта, что стандартизация охватывает более широкий круг объектов, включая производственные и социальные отношения; стандартизация – это эффективный инструмент создания систем управления качеством, причем не только на производстве, но и в сфере услуг.

Стандартизация сегодня является важнейшим механизмом управления качеством в здравоохранении. Стандарты необходимы для оценки качества (ситуационного анализа, с которого начинается любой управленческий цикл) и определения путей повышения качества (направление, в котором следует развиваться).

Стандартизация – это упорядочивание, унификация, разработка и установление требований, норм и правил. Деятельность в области стандартизации осуществляется в жестко определенном правовом поле, предполагает использование унифицированных терминов, изложение материала в соответствии с заданной структурой, подтверждение рекомендаций обыкновенным данным, проверяемость установленных требований, т.е. конкретику и однозначность. Особенности же медицинской науки и практики, напротив, заключаются в отсутствии однозначных причинно-следственных связей. Медицина – наука вероятностная, поэтому точность и конкрет-

ность – не самые типичные характеристики врачей. Кроме того, в своей повседневной работе медицинские специалисты ориентированы на интересы личности, пациента, а при работе над стандартами приходится мыслить на популяционном уровне, переходить от понятия «лучше для одного» к «лучше для большинства». Наконец, врач зачастую принимает решения единолично, опираясь на знания и опыт – собственные, своих учителей и уважаемых коллег. При работе над документами системы стандартизации приходится искать согласия с самыми различными специалистами, представителями различных научных направлений и школ. Все это приводит к трудностям, когда практическая стандартизация начинается без предварительной подготовки.

Целью организации и проведения работ по стандартизации в здравоохранении является создание и развитие системы стандартизации в данной отрасли как основы повышения качества профилактических и лечебно-диагностических мероприятий при решении задач сохранения и улучшения здоровья населения. При этом общие принципы, межотраслевые нормы и правила, особенно касающиеся таких «стыков» медицины и техники, как приборостроение, должны были развиваться в рамках ГСС в виде государственных стандартов, Общероссийских классификаторов и т.д., а специфические медицинские аспекты стандартизации – формировать систему стандартизации в здравоохранении.

Были согласованы основные принципы, на которых должна была базироваться система стандартизации в здравоохранении: принципы согласия, единообразия, значимости, актуальности, комплексности, проверяемости. Выделены следующие объекты стандартизации (рис. 1):

- организационные технологии;
- медицинские услуги;
- технологии выполнения медицинских услуг;
- качество медицинских услуг;
- квалификация медицинского, фармацевтического, вспомогательного персонала;
- информационные технологии;
- производство, условия реализации, качество лекарственных средств и изделий медицинской техники и т.д.

Определены также группы нормативных документов, которые следовало наполнять по мере реализации Программы работ.

Следует отметить, что оценивать качество в медицине принято с трех позиций: оценка ресурсов, оценка технологий и оценка последствий или результатов. Оценка этих компонентов всегда производится путем сопоставления реальной ситуации с эталоном, который, по сути, и является стандартом.

С 1997 по 2003 г. Министерством здравоохранения РФ в сотрудничестве с Федеральным фондом обязательного медицинского страхования (ФОМС) и Государственным комитетом по стандартизации, метрологии и сертификации велась активная работа по формированию системы стандартизации в здравоохранении в рамках Государственной системы стандартизации Российской Федерации (ГСС РФ).

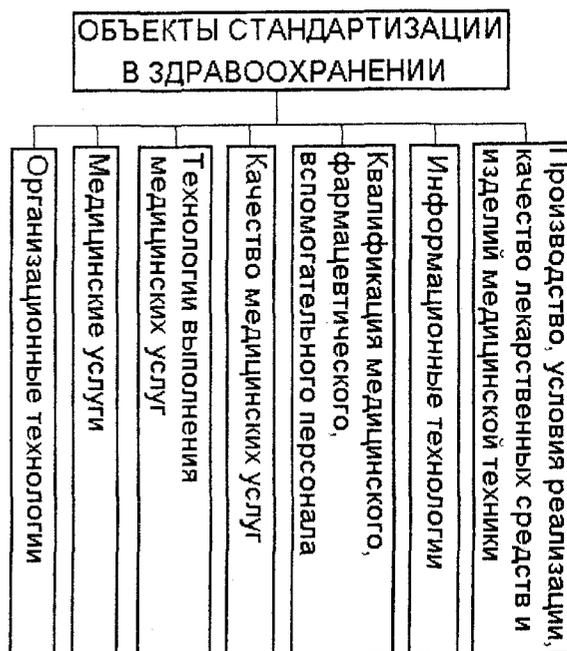


Рис. 1. Объекты стандартизации в здравоохранении

Введение в действие Федерального закона (ФЗ) от 27.12.2002 г. № 184-ФЗ «О техническом регулировании» изменило законодательные основы деятельности по стандартизации в РФ, что обуславливает необходимость актуализации нормативно-правовой документации в сфере стандартизации в здравоохранении, упраздняются отраслевые и административно-территориальные стандарты, которые составляли основу системы. Устанавливаемые стандартами любого уровня нормы и правила должны соблюдаться в добровольном порядке. Обязательные для выполнения требования к продукции, процессам и услугам могут теперь устанавливаться только в технических регламентах.

За установленный Законом переходный период (до 2010 г.) необходимо привести систему стандартизации в согласование с новыми законодательными нормами. Требования к некоторым объектам стандартизации уже оформляются в технических регламентах и национальных стандартах. Однако самое главное – определить место стандартов оказания медицинской помощи в обновленной системе, переутвердить правила их разработки, утверждения и применения. Очевидно, что стандарты оказания медицинской помощи не будут утверждаться в статусе технических регламентов. Утверждение их в статусе стандартов означает, что требования носят рекомендательный характер, соответственно необходимо искать управленческие механизмы, стимулирующие медицинские организации соблюдать установленные стандарты. Для организации и проведения работ по стандартизации на национальном уровне создан технический комитет «Медицинские технологии».

Основным направлением стандартизации в здравоохранении остается разработка протоколов ведения больных – нормативных документов системы стандартизации в здравоохранении, опреде-

ляющих требования к выполнению медицинской помощи больному при определенном заболевании, с определенным синдромом или при определенной клинической ситуации.

Протоколы – это полноценные нормативные документы, которые создаются специалистами с учетом научных доказательств эффективности, безопасности и экономической целесообразности медицинских технологий. Работа по созданию протоколов трудоемкая, требует немало времени, специальных знаний, навыков и терпения. Экспертов поджидает немало трудностей, связанных с поиском и критическим анализом научных данных, соотносением их со сложившейся практикой, рецензированием подготовленных текстов протокола, достижениям согласованного мнения нескольких разработчиков, которые зачастую являются представителями различных медицинских школ. Но именно такая работа приводит к формированию действительно полезного обоснованного документа, который может выполнять возложенные на него задачи.

Разработка протоколов ведения больных ведется с 1999 г. В период 1999–2003 г. протоколы утверждались в статусе отраслевых стандартов, и на них распространялись требования к разработке и внедрению нормативных документов системы стандартизации в здравоохранении.

В настоящее время нормативный статус протоколов окончательно не определен. Как и во всех других отраслях, до 2010 г. в здравоохранении предстоит решить вопрос об отмене или замене на национальные ранее принятых отраслевых стандартов и, соответственно, определить место протоколов и сформировать обновленные организационные механизмы их разработки и применения. Протоколы более не носят статуса отраслевого стандарта, однако по-прежнему являются основополагающими документами, определяющими требования к выполнению медицинской помощи больному при определенном заболевании, с определенным синдромом или в определенной клинической ситуации.

В течение 2004–2005 г. Министерством здравоохранения и социального развития РФ был разработан блок стандартов для амбулаторно-клинической и санаторно-курортной помощи по основным, наиболее часто встречающимся заболеваниям. Это небольшие по объему стандарты, представленные в табличной форме. В разработке этих стандартов приняли участие специалисты многих ведущих медицинских учреждений страны, но процедура достижения консенсуса при разработке нормативных документов системы стандартизации в здравоохранении была нарушена. В результате из стандартов исключались многие необходимые, по мнению экспертов, лекарственные средства, включались медицинские услуги, не имеющие обоснований своей эффективности. Так, мотивировкой для ограничений лекарственных средств служили опасения расширения списка льготных лекарственных средств для системы дополнительного лекарственного обеспечения. Как показала дальнейшая практика, врачи первичного звена не знакомы с современной лекарственной терапией и не назначают необходимых боль-

ному современных лекарств, отсутствие многих лекарств в стандартах медицинской помощи не повышает их доступности.

Очевидно, что стандарты медицинской помощи в виде таблицы не могут регламентировать помощь конкретному пациенту: в них отсутствует важнейший элемент – алгоритмы использования услуг и лекарств. Нет показаний, противопоказаний, типичных побочных эффектов, других ограничений и особенностей применения медицинских технологий. И, главное, нет никаких индикаторов качества оказания медицинской помощи. Вместе с тем эти стандарты ориентируют врача в перечне необходимых услуг и лекарств при определенной патологии, если он их не назначает, он должен обосновать свой отказ. Наоборот, назначая лекарственное средство сверх обозначенного в стандарте, необходимо обосновать и коллегиально подтвердить правильность своего выбора. Следовательно, появление стандартов медицинской помощи является важным шагом вперед в развитии системы стандартизации в здравоохранении [2].

Таким образом, врачу общей практики дан в руки стандартизированный механизм применения медицинских технологий. А что дальше? Легко предположить, что стандарт медицинской помощи будет усовершенствован в процессе актуализации. Но как оценить деятельность врача с точки зрения качества медицинской помощи? Пока ответа на данный вопрос нет. А ведь если не оценить качество на самом первом звене в цепи оказания помощи, не управлять качеством – то вся последовательность разрывается.

Возникает серьезная проблема индикации качества медицинской помощи на уровне первичного звена. Качество определяется ресурсами, правильностью выполнения технологий и результативностью. Если ресурсная база врача общей практики обсуждается, технологии в том или ином виде определены стандартами медицинской помощи, то учет результатов отсутствует. Нерешенным вопросом является самый важный: оценка удовлетворенности потребителя медицинской помощи – пациента.

Как оценить удовлетворенность? Может ли пациент оценивать профессиональную деятельность, не имея специального образования? Как сделать субъективную оценку объективной? В чем-то все эти проблемы перекликаются с проблемами оценки качества жизни.

В дальнейшем их можно актуализировать, гармонизировать с протоколами ведения больных (по мере их подготовки и утверждения). В настоящее время выполнена работа по подготовке аналогичных по форме стандартов высокотехнологичной помощи, ведется работа по формированию стандартов для стационаров и «скорой помощи».

Опыт работы над стандартами еще раз показал, как необходимы протоколы. Примечательно, что специалистам, уже участвующим в работе над протоколами, формировать стандарты было гораздо легче. И сами стандарты были более обоснованными с научной точки зрения, если уже существовали готовые протоколы.

Для создания стандартов необходимо, прежде всего, знать нормативно-правовые основы стандартизации, правила и принципы разработки и структуру нормативных документов. И разработчики стандартов должны научиться применять утвержденные классификаторы (работ и услуг, осложнений, фармакотерапевтических групп лекарственных средств и др.), использовать методы рационального принятия решений и моделирования.

Отдельная целенаправленная подготовка документации необходима по медицине, основанной на доказательствах (доказательная медицина, медицина доказательств) и клинико-экономическому анализу. Один из принципов разработки стандартов оказания медицинской помощи и протоколов ведения больных – использование научных доказательств для обоснования данных в протоколе рекомендаций. Однако реализовать этот принцип на практике довольно сложно, поскольку отечественные специалисты зачастую плохо знакомы как с концепцией медицины доказательств, так и с лежащей в ее основе эпидемиологией (в широком смысле этого понятия как фундаментальной медицинской науки о распространении, проявлении и происхождении болезней).

Работа над стандартами, протоколами ведения больных, требует навыков поиска и критической оценки научных исследований, посвященных методам профилактики, диагностики, лечения и реабилитации пациентов [3, 4].

Концентрация множественных трудностей не могла не сказаться на деятельности по стандартизации как механизме управления качеством. Но система стандартизации не остановилась в своем развитии. Значимость стандартизации в здравоохранении была отмечена Президентом РФ В.В. Путиным, который в одном из Посланий Федеральному Собранию РФ, формулируя задачи модернизации здравоохранения, сказал: «...гарантии бесплатной медицинской помощи должны быть общеизвестны и понятны. И по каждому заболеванию должны быть выработаны и утверждены стандарты медицинских услуг – с обязательным перечнем лечебно-диагностических процедур и лекарств, а также – с минимальными требованиями и условиями оказания медпомощи. Причем такие стандарты должны действовать в каждом населенном пункте Российской Федерации. И только дополнительная медпомощь и повышенный уровень комфортности ее получения должны оплачиваться пациентом».

Опыт работ по стандартизации показал, что достижение согласованного мнения – одна из самых сложных задач при разработке стандартов. Каждый высококвалифицированный специалист настаивает на своей позиции, считая её если не единственно правильной, то, по крайней мере, заслуживающей закрепления в статусе национального документа. Именно поиск консенсуса затягивает сроки разработки проектов новых стандартов, прежде всего клинических протоколов.

Как уже было отмечено выше, несмотря на введение в действие ФЗ «О техническом регулирова-

нии», до сих пор не созданы механизмы его реализации в сфере здравоохранения, и остается высокая степень юридической неопределенности в области разработки и утверждения нормативных документов. В соответствии с указанным законом до 2007 г. должны быть приняты конкретные решения о судьбе отраслевых стандартов. Либо требования и положения этих стандартов должны быть перенесены в технические регламенты, что придаст им статус обязательности для выполнения, или в национальные стандарты, которые носят рекомендательный характер, либо эти отраслевые стандарты прекращают свое существование. Определенные Федеральным законом процедуры разработки и принятия национальных стандартов и, тем более, технических регламентов являются в значительной степени трудоёмкими и длительными.

В настоящее время, в сложившихся новых условиях, было бы крайне неосмотрительным растерять то положительное, что сделано для формирования системы стандартизации в здравоохранении. Прежде всего, здравоохранению, как и всем отраслям, предстоит до 2010 г.:

- разработать и обеспечить принятие технических регламентов по важнейшим проблемам;
- решить вопросы с отменой, заменой на национальные ранее принятые отраслевые стандарты;
- развивать и обеспечивать активное функционирование технических комитетов по стандартизации в области здравоохранения, в том числе по медицинским технологиям;
- развивать систему стандартов организаций;
- готовить предложения с вескими обоснованиями по совершенствованию действующей законодательной базы в области здравоохранения (в том числе в отношении рассматриваемого Закона) [5].

Качество медицинской помощи – это забота всех медицинских работников, от медицинской сестры до главного врача и министра. Контролем качества в лечебных заведениях занимались всегда, тогда как управление качеством – понятие относительно новое. Сегодня система здравоохранения во всем мире и в нашей стране становится все более научно- и ресурсоемкой отраслью, связанной со сложнейшими технологическими и организационными процессами. Ошибка на одном этапе лечебно-диагностического процесса может привести к отсутствию ожидаемого результата на другом и как следствие – к значительным материальным издержкам. Поэтому задачей каждого медицинского работника становится правильное распределение имеющихся ресурсов при достижении необходимого результата. В этом так же и основная задача управления качеством медицинской помощи. Чтобы ее решить необходимо знать приемы управления, понимать причинно-следственные связи, соблюдать требования и нормативы, инструкции, выделять приоритеты и т.п., то есть каждый руководитель должен владеть наукой управления.

Практический опыт показал, что просто контролировать качество медицинской помощи нерационально: необходимо управлять организацией ле-

чебно-профилактического процесса, чтобы в самой системе были заложены принципы «защиты от сбоев» [6]. Принцип «легче предупредить нарушения качества, чем бороться с его последствием» оказывается верным и в этом случае. А вот создать такую систему – это задача сегодняшнего дня.

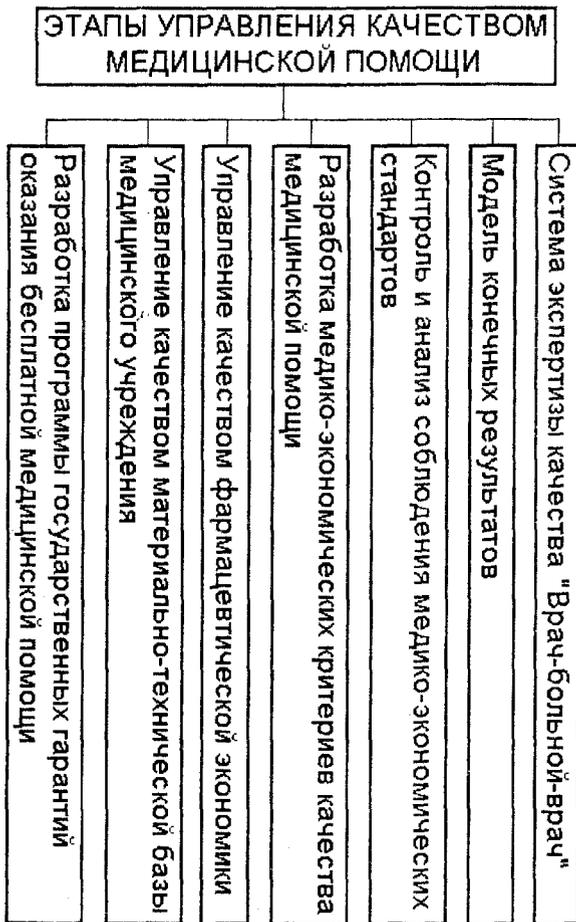


Рис. 2. Этапы управления качеством медицинской помощи

Среди направлений дальнейшего совершенствования системы управления качеством медицинской помощи можно выделить этапы (рис. 2):

1 Подуровневая система экспертизы качества «Врач-больной-врач».

2 «Модель конечных результатов» – это план, стимул для каждого руководителя в достижении определенных показателей работы, отражающих, в том числе и качественную сторону медицинской помощи. Это форма администрирования, дающая плановые показатели, которых должен достичь специалист или служба, и показатели дефектов, которых надо избегать. Результирующий показатель дает возможность наглядно оценить деятельность врача, лечебного учреждения или целевой службы.

3 Контроль и анализ соблюдения медико-экономических стандартов, которые были разработаны еще в 1994 г. Стандарты содержали критерии выздоровления, то есть планируемый результат оказания медицинской помощи, и те финансовые ресурсы, которые имеются для достижения этого результата. В этих стандартах действия врача не регламентировались – были возможны любые ме-

роприятия, которые позволяли добиться требуемого результата за отпущенные на это средства.

4 Разработка медико-экономических критериев качества медицинской помощи. Здесь может быть описан уровень оснащения больниц разного уровня, необходимый набор медикаментов, диагностических исследований и лечебных манипуляций при тех или иных формах выздоровления. Эти стандарты являются основой для оценки обеспечения и технологии лечебно – диагностического процесса.

5 Фармакоэкономика как элемент управления качеством медицинской помощи. Благодаря новой единой логистической информационной модели льготного лекарственного обеспечения фармако-экономический анализ имеющейся информации о назначении препаратов позволяет управлять качеством медицинской помощи.

6 Работа с материально-технической базой медицинского учреждения. Рациональное использование оборудования тоже становится предметом, определяющим качество медицинской помощи.

7 Порядок и принципы разработки программы государственных гарантий оказания бесплатной медицинской помощи. В программу включаются объемно-нормативные показатели по видам медицинской помощи, то есть, по сути, создается модель конечных результатов.

Таким образом, трудные задачи стоят сегодня перед здравоохранением, и одна из них – совершенствование системы управления качеством. И в этом направлении деятельности стандартизации отводится роль важнейшего механизма управления качеством.

**Литература:**

- 1 Красильников А.В. Анкетирование пациентов как критерий оценки качества медицинской услуги / А.В. Красильников // Проблемы управления здравоохранением. – 2005. – №1. – С.34-38.
- 2 Вялков А.И. Состояние системы управления качеством в здравоохранении / А.И. Вялков, П.А. Виноградов // Проблемы стандартизации в здравоохранении. – 2005. – №12. – С.3-6
- 3 Вялков А.И. Как далеко можно зайти на пути обеспечения качества медицинской помощи / А.И. Вялков, П.А. Воробьев, Д.В. Лукьянцева, М.В. Авксентова // Проблемы стандартизации в здравоохранении. – 2005. – №11. – С.3-5.
- 4 Вялков А.И. Современное состояние системы стандартизации в здравоохранении России / А.И. Вялков // Проблемы стандартизации в здравоохранении. – 2004. – №12. – С.3-5
- 5 Виноградов В.А. Эффективный брэндинг на российском рынке медицинских услуг / В.А. Виноградов // Ремедиум. – 2005. – №5. – С.19-21.
- 6 Павлов В.В. От контроля – к управлению качеством медицинской помощи / В.В. Павлов, А.К. Каширин // Проблемы стандартизации в здравоохранении. – 2004. – №5. – С.6-8.
- 7 Симонов Ю.А. Техническое регулирование в сфере услуг // Стандарты и качество. М., 2004. – №5. – С. 44-45.
- 8 Сюткин Г.Н. Сертификация безопасности и качества услуг. – М.: Издательство стандартов. – 2003. – 231 с.